

**A conjugação das
nossas emulsões
explosivas, detonadores
electrónicos e apoio técnico
especializado, conduzem
a resultados técnicos,
económicos e
ambientais mais
sustentáveis.**

Orica Mining Services Portugal, SA

Av. Duque d'Ávila, nº 95, 2º andar
1000-139 Lisboa
Portugal

Tel: +351.962373166
Fax: +351.213571315
email: orica.portugal@orica.com



www.orica.com

DETÓNICA

Vol. XIX Nº 52 Dezembro 2019

PROPRIEDADE

Associação Portuguesa de Estudos e Engenharia de Explosivos
Avenida da Universidade de Coimbra
5150-277 Condeixa-a-Nova
PORTUGAL
Tel: +351 239 941 234
Email: secretariado@ap3e.pt
Portal: ap3e.pt

DIRECTOR

José Carlos Góis

COORDENADOR EDITORIAL

José Carlos Góis

COLABORARAM NESTE NÚMERO

Luís Reis
Jorge Raposo
Daniela Alves
Cláudia Pinto
Domingos Xavier Viegas
José Carlos Góis
Carlos Ferreira
José Ribeiro
Vinicius Gouveia
Francisco Leite
Pedro Brito
Raquel Sobral
Alexandre Leite
Francisco Marques

Distribuição

Gratuita aos associados AP3E e entidades públicas no sector dos explosivos

Periodicidade: Semestral

Subscrição anual: 20 €

Apoios

Edição parcialmente subsidiada pelas empresas: Orica, Maxampor, O-Pitblast, Moura Silva & Filhos, GJR – Pirotecnica e Explosivos, Propyro

Execução gráfica

OGAMI

Tiragem: 150 exemplares

SUMÁRIO

5 Editorial

6 Emprego de artigos pirotécnicos e sua relação com a ignição de incêndios florestais

15 Avaliação dos impactes ambientais de munições militares

21 Controlo do desvio de furos através do uso de sensores eletrónicos: uma aproximação de Euler

30 Testes de campo do protótipo FRAGTrack™ Mobile e comparação com modelos de fragmentação empíricos



o-pitblast

The Most Advanced Blast Design & Optimization Platform



Dilution Control



Pattern Expansion



Vibration Analysis



Mine2Mill Optimization



Fragmentation Analysis



UAV Photogrammetry Analysis

Topography



Pattern Design



Timing Control



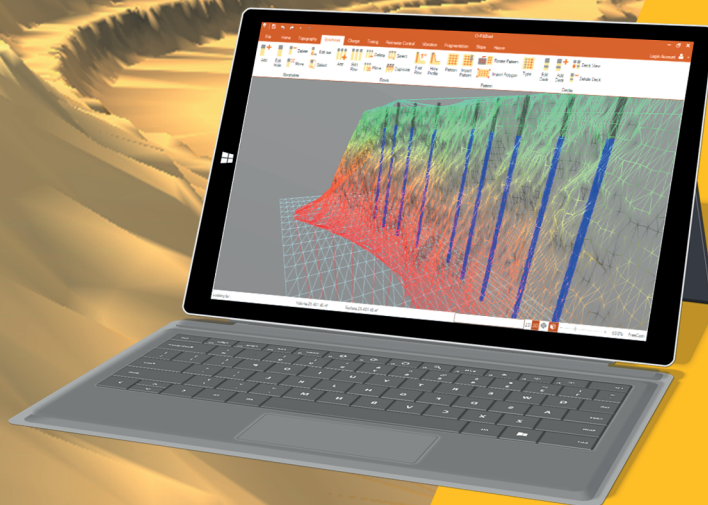
Fragmentation



Vibration



Optimization



www.o-pitblast.com

O-Pitblast, Lda. | Rua de Belém 467 | 4350-071 Porto, Portugal | +351 224 096 803 | info@o-pitblast.com

EDITORIAL

Caros leitores,

Esta edição do Boletim Informativo DETÓNICA, dá continuidade à divulgação de artigos técnicos sobre o desenvolvimento e emprego de novas tecnologias no desmonte de maciços rochosos. São também dadas a conhecer as atividades de investigação no domínio dos impactes ambientais relacionados com o fabrico e emprego de munições e apresenta ainda um artigo resumo de um estudo sobre o emprego de artigos de pirotecnia e a sua relação com a ignição de incêndios florestais.

A *newsletter* AP3E e a página *ap3e.pt* mantêm-se como os principais meios de divulgação de notícias, informações de carácter legislativo e de divulgação de eventos técnicos na área da engenharia de explosivos. Porém, no ano de 2019 a página *web* não funcionou conforme previsto, tendo-se mantido inacessível durante um longo período, devido a dois ataques de pirataria informática. Muito embora a página tenha sido reposta, mantêm-se ainda algumas falhas, que têm limitado a divulgação de informação. Entretanto, já foram tomadas diligências no sentido de reformular a página, de modo a torná-la mais robusta aos ataques de hackers. Contamos no primeiro trimestre de 2020 poder oferecer uma página *web* mais atrativa e de fácil consulta.

No âmbito das atividades de divulgação de trabalhos académicos, no domínio da engenharia de explosivos, está a decorrer, até final de fevereiro de 2020, o concurso ao **Prémio AP3E de Engenharia de Explosivos 2019**. Podem concorrer alunos do Ensino Superior em Portugal, com a submissão de trabalhos académicos redigidos em Português ou Inglês (Tese de Doutoramento, Dissertação de Mestrado ou outro qualquer trabalho de Investigação), apresentados há menos de dois anos, e um artigo resumo do referido trabalho ou de parte deste. O trabalho vencedor receberá um Prémio de 750 €. Para mais informações deverá ser consultada a página *ap3e.pt* ou dirigido email a *secretariado@ap3e.pt*.

A divulgação da engenharia de explosivos junto das comunidades escolares do ensino superior em Portugal tem sido uma prática da AP3E, com a realização de Seminários sobre Explosivos e Operações de Desmonte de Maciços Rochosos. Nestes seminários, para além da intervenção de elementos da Direção da AP3E, têm sido convidados como oradores ex-alunos da universidade ou do instituto politécnico, com atividade na área da engenharia de explosivos. Pontualmente, são também convidados para oradores representantes de outras entidades com intervenção no setor dos explosivos em Portugal. No Seminário realizado no final de novembro na Universidade de Aveiro foi convidado o DAE/PSP para apresentar a proposta de revisão do regime jurídico para os produtos explosivos.

A formação e a certificação de competências dos profissionais no setor dos explosivos, que têm vindo nos últimos anos a ser discutidas e desenvolvidas em vários projetos europeus, vão marcar a próxima década. A proposta do novo regime jurídico já dá alguns passos nesse sentido, com a obrigatoriedade de formação e avaliação de conhecimentos para o exercício de algumas das atividades com produtos explosivos. Na última década a aposta das empresas foi na certificação pelas normas de qualidade e mais recentemente pelas normas ambientais. A próxima década será a certificação pelas normas de certificação de competências. O catálogo nacional de qualificações é muito limitado em perfis profissionais para o sector dos explosivos, referindo apenas o “Operador Mineiro – nível 2”. Temos por isso um desafio pela frente, seja no desenvolvimento de cursos de formação, seja na definição dos perfis profissionais, ou na forma de certificação de competências. A segurança passa pela formação e deve ser por isso uma prioridade para inverter os indicadores de sinistralidade.

Esperamos que os leitores do DETÓNICA possam tirar proveito deste número e esperamos contar com a vossa colaboração, com o envio de artigos para o próximo número, previsto para maio do próximo ano.

José Carlos Góis

Emprego de artigos pirotécnicos e a sua relação com a ignição de incêndios florestais

The use of fireworks articles and their relation with the ignition of forest fires

Luís Reis (luis.reis@dem.uc.pt); Jorge Raposo; Daniela Alves; Cláudia Pinto; Domingos Xavier Viegas; José Carlos Góis LAETA-ADAI; Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Neste trabalho é apresentado o resultado de um estudo sobre o emprego de artigos pirotécnicos e a sua relação com a ignição de Incêndios Florestais (IF) solicitado por associações do setor dos explosivos e pirotecnia à Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI). Foi realizada uma análise do número de ocorrências e de área ardida de incêndios florestais verificadas em Portugal Continental, no período de 2003 a 2018, através da base de dados disponível na página do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF). Além disso, foram realizados ensaios com artigos pirotécnicos de forma a averiguar a possibilidade de ignição de um incêndio florestal.

This paper presents the results of a study on the use of fireworks articles and their relation with the ignition of forest fires (IF) requested by explosives and pyrotechnics associations to the Association for the Development of Industrial Aerodynamics (ADAI). An analysis of the number of occurrences and burnt area of forest fires in Portugal, from 2003 to 2018, through the database available on the website of the Institute for Nature Conservation and Forests (ICNF) was performed. In addition, tests with fireworks articles in order to verify their possibility of igniting a forest fire were carried out.

1. Introdução

Nos últimos anos Portugal tem vindo a sofrer de grandes e devastadores IF que criaram na sociedade um sentimento de impotência, medo e algumas vezes de pânico, em relação a este fenómeno.

O facto de o lançamento de foguetes em festas populares, muitas vezes feito por operadores não credenciados, ter originado vários incêndios no passado, gerou na opinião pública a convicção de que o lançamento de artigos pirotécnicos, vulgo foguetes, estaria associado à ocorrência de incêndios. Como é frequente associar os espetáculos de fogo-de-artifício ao lançamento vários artigos pirotécnicos, que não necessariamente foguetes, formou-se a convicção de que o emprego de artigos pirotécnicos constituía um perigo de IF.

Esta convicção terá levado as autoridades e as câmaras municipais a criar fortes condicionalismos ao licenciamento de espetáculos de artigos pirotécnicos, em especial durante o período crítico (1 de julho a 30 de setembro). Neste período o lançamento de foguetes, qualquer que seja a classe de risco, é proibido.

A indústria pirotécnica em Portugal foi consequentemente afetada pelos eventos extremos de IF, na medida em que a utilização de artigos pirotécnicos, em espetáculos, tem sido alvo de sérias restrições, mesmo em épocas do ano fora do período crítico. Como exemplo, constatámos a proibição do

uso de foguetes em dias para os quais a classe de incêndio foi elevada ou muito elevada. Adicionalmente às interdições referidas, existem as proibições relacionadas com a declaração da situação de alerta, devido ao elevado risco de incêndio, que tem conduzido à proibição da realização de espetáculos pirotécnicos, independentemente das características dos artigos utilizados ou dos locais de lançamento ou de medidas de segurança aplicadas. Desde 2006, com a aplicação de nova legislação (Decreto-lei n.º 124/2006 de 28 de junho), a pirotecnia em Portugal desenvolveu-se tecnicamente no sentido de dispor de artigos de menor perigo no seu lançamento e de baixo risco de ignição de incêndios florestais.

Apesar de existirem normas técnicas e regras para o licenciamento de espetáculos de fogo-de-artifício, continuam a existir restrições ao emprego de artigos pirotécnicos que parecem não reconhecer este avanço. Além disso, os critérios de licenciamento do uso de artigos pirotécnicos não são uniformes em todo o País, sendo objeto de uma ampla discricionariedade e subjetividade.

A fim de contribuir para um melhor conhecimento da situação, um conjunto de associações do setor dos explosivos e pirotecnia contactou a Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) solicitando a realização de um estudo independente, para averiguar as implicações atuais da utilização de

artigos pirotécnicos, avaliar as condições de lançamento desses artigos, em eventos realizados por operadores profissionais, e a sua relação com a ocorrência de IF, à luz da legislação existente e da evolução técnica que houve.

Com base na análise dos dados estatísticos de IF causados por artigos pirotécnicos, no período de 2003 a 2018, foi estudada a incidência desta causa em termos de número de ocorrências/incêndios e de área ardida. Além disso, foram realizados ensaios com artigos pirotécnicos, com o intuito de conhecer melhor e de analisar as características dos artigos mais usados atualmente em Portugal. O conhecimento destas propriedades, e das condições de lançamento, permitirá fundamentar a metodologia de avaliação do risco de incêndio.

2. Estatística de ocorrências

A análise dos dados estatísticos foi realizada de acordo com a base de dados de IF disponível na página do ICNF, de 2003 a 2018, onde se encontra presente para cada ano, a data de alerta, o distrito, a área ardida, e outros dados acerca de cada ocorrência de incêndio florestal. Para um grande número de incêndios, cuja causa foi investigada, dispõe-se do código causa respetivo.

Os Códigos Causa (CC) foram definidos pela Direção Geral dos Recursos Florestais (DGRF) do ICNF, sendo que estão divididos em sete categorias de causas, cada uma delas dividida em grupos, que por sua vez podem apresentar subgrupos. A classificação das causas dos IF assume uma estrutura hierárquica de três níveis, conforme descrito no documento da DGRF, identificando-se cada causa específica com dois ou três algarismos, o primeiro algarismo identifica uma das sete categorias de causa; o segundo algarismo discrimina as causas do nível anterior, identificando-as em grupos e discriminando as atividades específicas e, o terceiro algarismo divide em subgrupos as atividades causantes e discrimina comportamentos e atitudes específicas.

Os códigos causa designam o seguinte:

1. Uso do Fogo;
2. Acidentais;
3. Estruturais;
4. Incendiarismo;
5. Naturais;
6. Indeterminadas;
7. Reacendimentos.

O código causa 7 apenas foi definido a partir do ano de 2012 e como tal, os resultados deste Código Causa apenas surgem a partir deste ano.

Na Figura 1 e na Figura 2 são apresentados o número de ocorrências e a área ardida em hectares [ha], respetivamente, total (todos os código causa) e o total dos código causa conhecidos, ou seja, com a exceção do código causa “6 – Indeterminadas”, no período de 2003 a 2018. O valor de área ardida apresentado nas figuras seguintes é a soma das áreas ardidas de povoamento, de mato e agrícola.

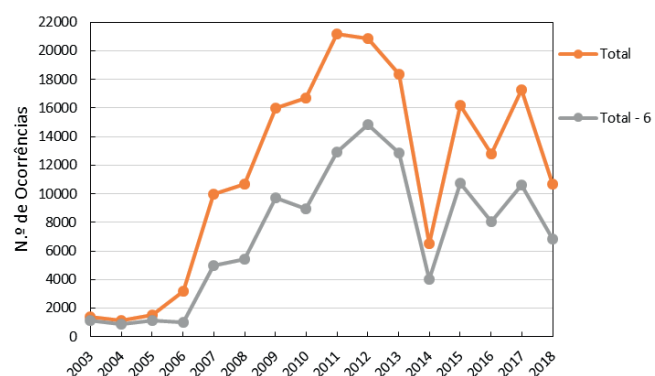


Figura 1 – Número de ocorrências de IF total e total menos código causa “6 – Indeterminadas”, no período de 2003 a 2018.

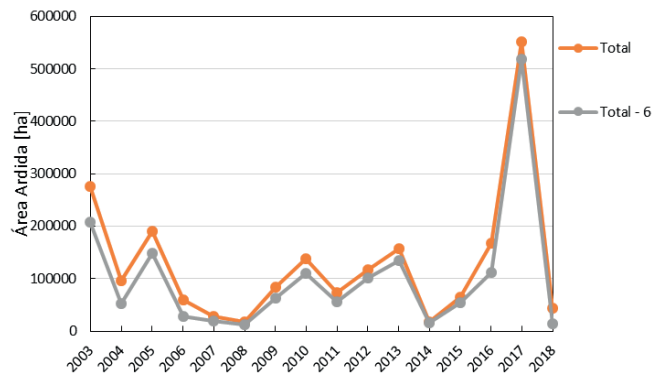


Figura 2 – Área ardida total e total com a exceção do código causa “6 – Indeterminadas”, de 2003 a 2018.

Na análise das figuras anteriores verifica-se que existe uma diferença média, no período de 2003 a 2018, de cerca de 30% entre o número de ocorrências e de área ardida, total e o total conhecidas (exceção do código causa “6 - Indeterminadas”). Além disso, é de notar que o número de ocorrências com causa investigada, até 2005 era inferior a 2000 por ano e após 2006 houve um aumento até 2011, com cerca de 21100 ocorrências investigadas; após 2011 houve um decréscimo do número de ocorrências. No caso da área ardida, de 2003 a 2008 houve uma redução de cerca 270kha para 16kha; de 2008 a 2013 houve um aumento de área ardida para cerca de 157kha; após

2013 a área ardida tem sido inferior a 167kha, com exceção de 2017 com 551kha.

Na Figura 3 são apresentados os valores totais de ocorrências de IF para os códigos causa 1 a 7, de 2003 a 2018.

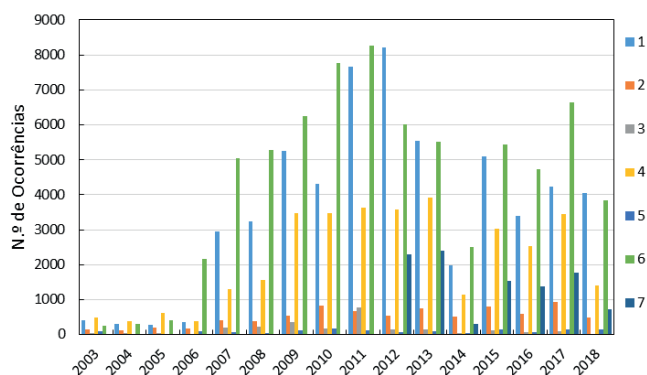


Figura 3 – Número de ocorrências de IF por categoria de causa.

Na análise da figura constatamos que, no período de 2003 a 2006, o número total de ocorrências investigadas é inferior a 3200 ocorrências por ano. De 2007 a 2018 o valor de ocorrências investigadas aumentou (2007 com cerca 10000 ocorrências e 2011 com cerca 21100 ocorrências), com a exceção de 2014, em que este valor diminuiu para cerca de 6500 ocorrências. A categoria de causa “1 - Uso do Fogo” é a segunda com o maior número de ocorrências, a seguir à que está definida como “6 - Indeterminadas”. A Figura 4 apresenta a área ardida, em hectares [ha], para os códigos causa 1 a 7, de 2003 a 2018.

Os valores percentuais apresentados nesta secção foram determinados tomando como valor total a soma das ocorrências cujas causas são conhecidas (soma dos códigos causa 1 a 5, e 7). Foram assim excluídos os casos associados ao código causa “6 – Indeterminadas”.

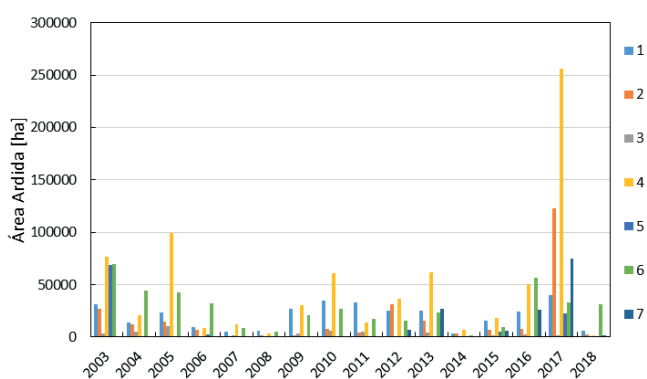


Figura 4 – Área ardida total por categoria de causa.

Na análise da figura conclui-se que a categoria de causa que apresenta maior área ardida é a causa “4 – Incendiarismo”, com cerca de 46% da área ardida.

O ano em que se registou a maior área ardida foi 2017, com cerca de 551kha, tendo-se registado uma área ardida por “4 – Incendiarismo” superior a 250kha. No conjunto dos anos, a causa “1 - Uso do Fogo”, que incorpora o grupo de lançamento de artigos pirotécnicos, teve cerca de 19% da área ardida total (cerca de 325kha), a terceira causa mais presente.

Com a análise dos dados disponíveis é possível verificar que não existe relação entre o número de ocorrências e a área ardida. Ou seja, existem causas que apresentam um grande número de ocorrências de IF, mas podem apresentar áreas ardidas pequenas.

Na Figura 5 são apresentados os números de ocorrências de IF para os grupos de causa 11 a 17.

A designação dos grupos de códigos causa, associados ao “1 - Uso do Fogo”, segundo a DGRF é a seguinte:

- 11 – Queima de lixo (destruição de lixos pelo fogo);
- 12 – Queimadas (queima pelo fogo de combustíveis agrícolas e florestais);
- 13 – Lançamento de foguetes (uso do fogo para diversão e lazer);
- 14 – Fogueiras (uso do fogo com combustíveis empilhados);
- 15 – Fumar (fumadores que lançam as pontas incandescentes ao solo);
- 16 – Apicultura (uso do fogo por apicultores);
- 17 – Chaminés (transporte de partículas incandescentes).

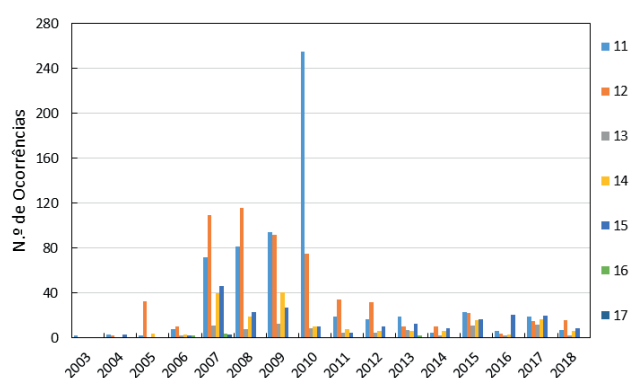


Figura 5 - Número de ocorrências de IF por grupos de causa de 11 a 17.

O grupo de causas com maior número de ocorrências é o “11 - Queima de lixo” com cerca de 632 ocorrências (0,55% do número ocorrências total), durante o período de 2003 a 2018, sendo que o ano de 2010 teve um pico com 255 ocorrências. No caso do grupo de

causa “13 - Lançamento de foguetes” apresenta um valor total, de 2003 a 2018, de 90 ocorrências.

A Figura 6 apresenta a área ardida, em hectares [ha], para o grupo de códigos de causa de 11 a 17, de 2003 a 2018.

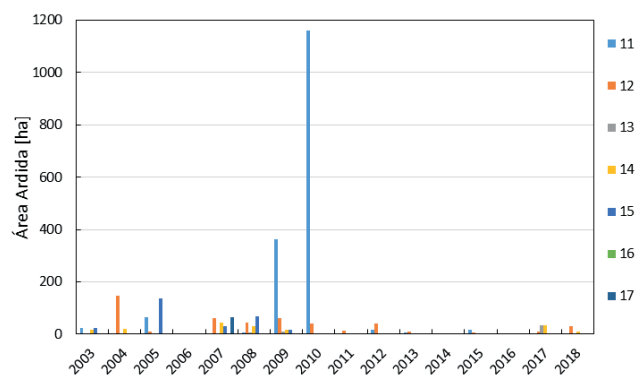


Figura 6 - Área ardida por grupos de causa de 11 a 17.

Nas figuras anteriores é possível verificar que o ano 2010 apresenta um elevado número de ocorrências associado ao código causa “11 – Queima de lixo”, a que correspondeu um elevado valor de área ardida. O grupo de código causa com maior área ardida no conjunto dos anos foi o “11 - Queima de lixo” com cerca de 1668 hectares (0,10% da área ardida).

Os IF causados pelo lançamento de artigos pirotécnicos estão integrados na primeira categoria de causa que tem o nome de “Uso do Fogo” (código causa 1), no grupo de “Lançamento de Foguetes” (código causa 13), que por sua vez apresenta três subgrupos. Neste caso serão analisados com maior detalhe os códigos causa seguintes:

- 13 – Lançamento de foguetes para diversão e lazer;
- 131 – Com medidas preventivas, no caso do lançamento de foguetes com licenciamento, seguros, presença dos corpos dos bombeiros, autoridades, etc.;
- 132 – Clandestinos, no caso do lançamento clandestino de foguetes sem qualquer medida preventiva, incluindo as anteriores;
- 133 – Autoignição, no caso da ignição de material explosivo proveniente do lançamento de foguetes, decorrido algum tempo.

Chama-se a atenção para o facto de que os subgrupos 131, 132 e 133 não constituem subdivisões do grupo 13, mas correspondem a causas que não se encontram incluídas na causa 13 – “Lançamento de foguetes”. Este grupo de causa (13) tem de ser analisado da mesma forma que os subgrupos acima mencionados. Para clarificar este assunto, parecia-nos ser mais adequado designar por código causa o grupo 13,

englobando os subgrupos 131, 132, 133 e definindo um novo subgrupo 134, correspondendo a “Lançamento de foguetes para diversão e lazer”.

Na Figura 7 são apresentados os números de ocorrências de IF para o grupo 13 e subgrupos 131, 132 e 133, de lançamento de artigos pirotécnicos, e na Figura 8 o seu valor percentual. Na legenda das Figura 7 e 8, o valor “Total” corresponde à soma das causas do grupo e dos subgrupos mencionados.

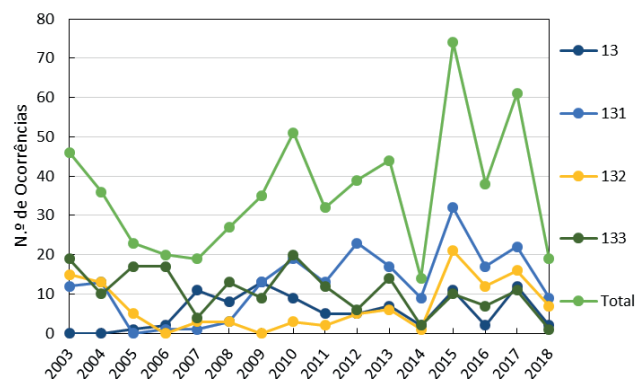


Figura 7 – Número de ocorrências de IF para o lançamento de artigos pirotécnicos.

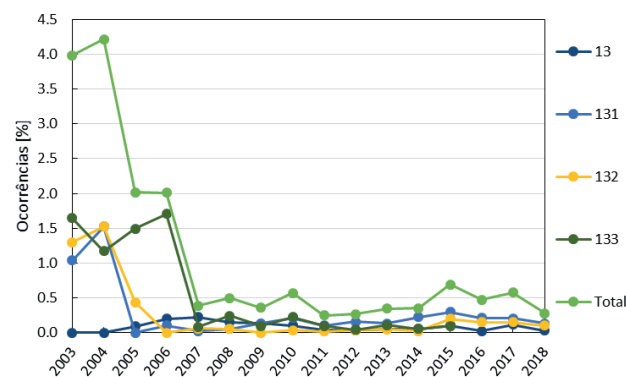


Figura 8 – Percentagem de ocorrências de IF para o lançamento de artigos pirotécnicos.

Verificámos que o número médio de ocorrências de lançamento de artigos pirotécnicos por ano, foi de cerca de 36. Até à entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 124/2006, de 28 de junho, a percentagem de ocorrências de IF com o lançamento de artigos pirotécnicos era superior a 2%. Após 2006, esse valor tornou-se inferior a 1%. Retirando alguns casos pontuais de IF podemos indicar que o valor é em geral inferior a 0,5%. A partir de 2006 o número de casos investigados tornou-se muito superior, mesmo assim a percentagem destas ocorrências diminuiu.

Na Figura 9 são apresentadas as áreas ardidas de IF para o grupo e subgrupos de lançamento de artigos pirotécnicos, e na Figura 10 o respetivo valor percentual.

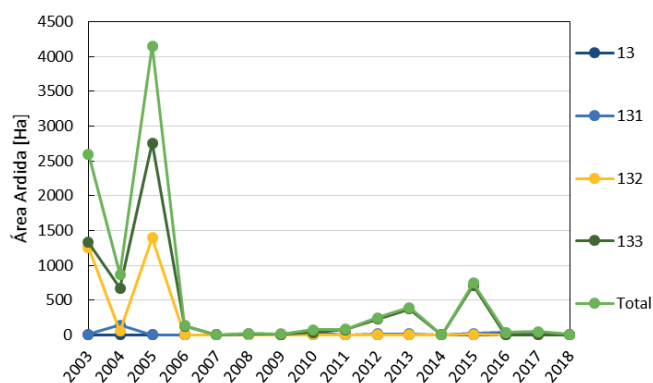


Figura 9 – Área ardida de IF para o lançamento de artigos 8pirotécnicos.

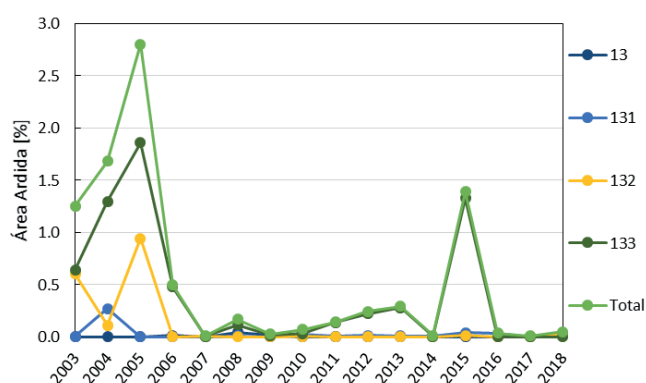
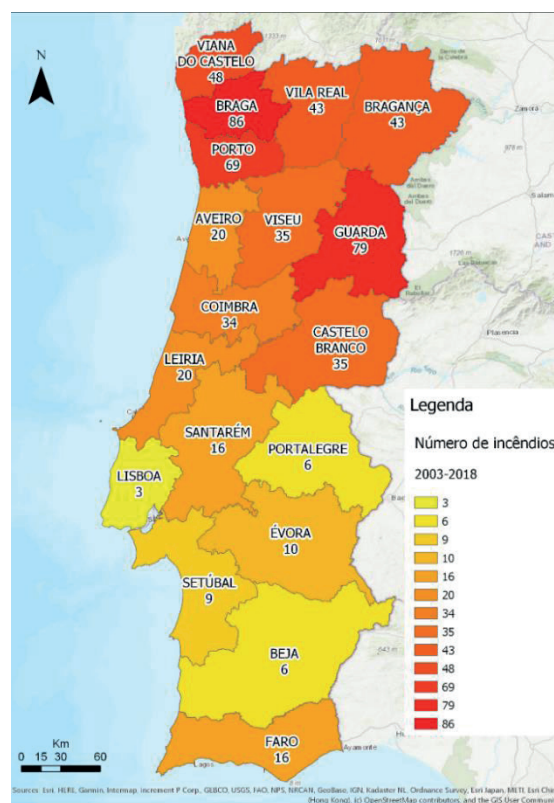


Figura 10 – Percentagem de área ardida de IF para o lançamento de artigos pirotécnicos.

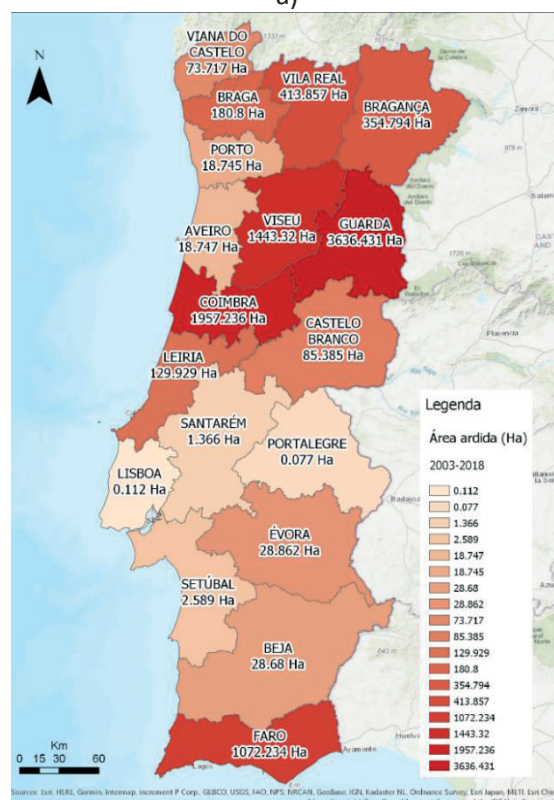
Da análise das figuras é possível verificar a diferença de área ardida no período anterior a 2006 e após este ano. No período de 2003 a 2005 existia, em média, uma área ardida de cerca de 2540 hectares por ano; após o ano de 2006 a área ardida diminuiu para cerca de 140 hectares por ano e a percentagem foi em geral inferior a 0,5%. No ano de 2015 verifica-se um aumento de área ardida, devido a um único IF identificado, pelo subgrupo de causa 133, no concelho de Miranda do Corvo com cerca de 716 hectares de área ardida.

Na Figura 11 são apresentados a) o número de ocorrências e em b) a área ardida de incêndios florestais para o lançamento de artigos pirotécnicos (código causa 13, 131, 132 e 133), de 2003 a 2018, em cada um dos 18 distritos de Portugal Continental.

Nestas figuras pode observar-se uma prevalência de ocorrências nos distritos do Norte e Centro do País. No caso da área ardida observa-se também que os incêndios desta tipologia têm maior expressão nas zonas Norte e Centro do País e no Algarve.



a)



b)

Figura 11 – a) Número de ocorrências e de b) área ardida de IF para o lançamento de artigos pirotécnicos em cada distrito, no período de 2003 a 2018.

3. Ensaios experimentais

Os ensaios com os artigos pirotécnicos decorreram no dia 12 de março de 2019, no Aeródromo da Lousã, com o intuito de estudar a eventual relação entre o lançamento de artigos pirotécnicos e a ocorrência de IF. Os ensaios foram efetuados com a colaboração das associações AP3E, APIPE e ANEPE, estiveram presentes as seguintes empresas de Pirotecnia: Pirotecnia do Dão, Carlos Duarte, Douro Pirotecnia, GJR Pirotecnia e Explosivos, Macedos Pirotecnia, Pirotecnia de Barbeita, Pirotecnia Minhota, Pirotecnia Oleirense e Propyro.

Os lançamentos foram efetuados por operadores credenciados que procederam à montagem e realização do evento pirotécnico para fins de investigação. Foi delimitada uma Zona de Lançamento (ZL) com fita de segurança e a partir desta, foram definidos raios de segurança, que eram ajustados a cada artigo utilizado. Este evento foi devidamente licenciado e comunicado aos agentes de proteção civil. O tráfego aéreo do aeródromo foi interditado para o efeito durante este dia.

As condições meteorológicas foram monitorizadas durante a execução dos ensaios através de uma estação meteorológica instalada no local.

Após o lançamento ou ignição de cada artigo pirotécnico e executado o efeito foi avaliado as quantidades de partículas libertadas, sua dispersão, temperatura equivalente e possibilidade de ignição de incêndio florestal. Recorremos ao uso de duas câmaras termográficas de infravermelhos (IR) de alta resolução, colocadas respetivamente no topo da torre de controlo do aeródromo e na pista, próximo da ZL. As câmaras IR foram recolhendo informação geral e local, sobre as temperaturas equivalentes registadas ao longo de cada ensaio com o lançamento dos artigos e dos resíduos resultantes, doravante denominados de partículas. Foram também recolhidas imagens de alta definição na gama de visível para determinação das trajetórias dos artigos, com três câmaras vídeo.

Os locais de queda das partículas foram analisados após cada ensaio recorrendo a duas equipas de especialistas de comportamento de fogo, que utilizando um GPS de alta precisão mapearam e analisaram cada partícula identificada visualmente e com auxílio das câmaras de infravermelhos.

Neste estudo foram efetuados 28 ensaios com 26 diferentes artigos pirotécnicos. Na Tabela 1 são apresentados os artigos utilizados nos ensaios, assim como a referência das partículas do artigo identificadas, a hora de início e fim de ensaio, a

duração aproximada do ensaio e a categoria de cada artigo. As partículas em análise são definidas por uma letra maiúscula, ou seja, a partícula A corresponde ao ensaio n.º 1; o número a seguir à letra, referencia o número da partícula analisada deste ensaio, por exemplo, A1 referencia a partícula número um (1). Salienta-se que o artigo “Cascata 3m de largura (altura de efeito 5m)” foi realizado 3 vezes, duas de forma idêntica, com o combustível existente no solo, HER-01: Herbáceas (modelo de combustíveis ADAI) e outra com palha no solo, como combustível, com uma carga de 1kg/m², para verificar a possibilidade de ignição de IF através do uso do referido artigo pirotécnico.

Tabela 1 - Artigos pirotécnicos utilizados nos ensaios no LEIF, com o nome do artigo, a referência da partícula identificada, a categoria e a hora de início / fim do ensaio.

N.º do Ensaio	Ref. da Partícula	Artigos	Qtd.	Categoria	Hora de início-fim	Duração [min.]
1	A	Repuxo sem Fumo - Repuxo Prata e Dourado 3M	3	F1	10:40-10:41	1
2	B	Baterias 49'S - Bateria 49'S Assorted Peony	3	F2	10:50-10:53	3
3	C	Baterias 19'S - Baterias 19'S Red Green Blue	3	F3	11:01-11:03	2
4	D	Foguetes - 3 tiros	3		11:12-11:14	2
5	E	Vulcão 30mm Vermelho	3	T1	11:18-11:19	1
6	F	Cascata 3m largura (altura efeito 5m)	1	T2	11:22-11:23	1
7	G	Peça de Fogo Preso	1	F4	11:29-11:35	6
8	H	Foguete - Corpo rígido	3		11:41-11:44	3
9	I	Cascata 3m largura (repetição)	1	T2	11:50-11:51	1
10	J	Candela 30mm Multicolor (cometas)	3		12:03-12:05	2
11	K	Balona 50mm Peony	3	F4	12:18-12:19	1
12	L	Balona 75mm Peony	3		12:20-12:21	1
13	M	Balona 100mm Peony	3		12:27-12:28	1
14	N	Balona 125mm Peony	3		12:35-12:36	1
15	O	Balona 150mm Peony	2		12:43-12:44	1
16	P	Cascata 3m largura (repetição c/palha)	1	T2	12:57-13:02	5
17	Q	Monótipo 2 - Morteiro	3		14:56-14:58	2
18	R	Bateria 10/A	1		15:06-15:07	1
19	S	Bateria 5 Tiros	1		15:12-15:13	1
20	T	Bateria Tiro de Rajada	1	F4	15:20-15:21	1
21	U	Balona Tiro B 75mm	3		15:27-15:28	1
22	V	Balona Tiro B 50mm	3		15:38-15:39	1
23	W	Balona 5 Tiros 50mm	3		15:43-15:44	1
24	X	Balona Bateria B4 75mm	3		15:47-15:48	1
25	Y	Balona Cargas C6 75mm	3		15:50-15:51	1
26	Z	Balona Metralhadora M3 75mm	3		15:54-15:55	1
27	AA	Foguetes 2 Tiros	3	F3	16:00-16:02	2
28	AB	Foguetes Bateria B1	3		16:05-16:07	2

Os dados recolhidos sobre a dispersão de partículas libertadas são apresentados no formato gráfico dum mapa com os raios alcançados e com a informação relativa às diferentes partículas no que concerne à distância alcançada. A orientação das partículas foi definida com a referência ao ponto cardeal Norte (0º). Na Figura 12 é apresentado um dos locais de lançamento dos artigos (estrela) e os locais de queda de todas partículas observadas (pontos).

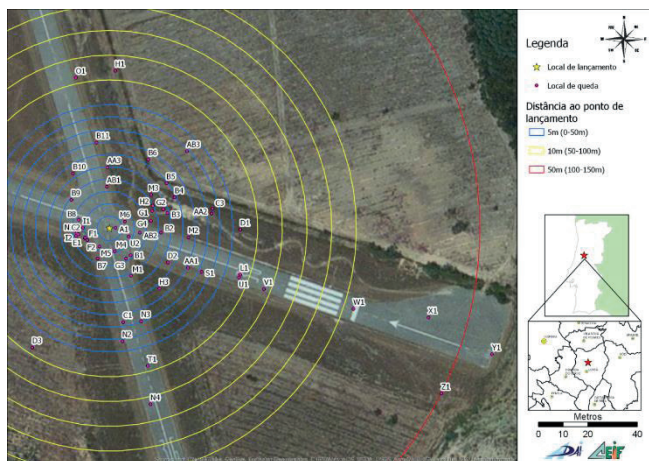


Figura 12 – Mapa de um local de lançamento dos artigos pirotécnicos e de todas as partículas identificadas.

Na Figura 12 podemos verificar que todas as partículas estão compreendidas em uma distância inferior a 165m do local de lançamento. Observamos ainda que as partículas dos artigos seguiram preferencialmente a direção do vento ao longo do dia.

De acordo com a Norma Técnica n.º 3/2018 da Polícia de Segurança Pública, para a utilização de artigos pirotécnicos, todos os artigos ensaiados cumpriram as distâncias de segurança a espaços florestais definidas. Na Tabela 2 são apresentadas as direções e a velocidade do vento presente durante cada ensaio, assim como a altura máxima atingida para cada artigo pirotécnico. Em alguns ensaios não foi avaliada a altura máxima da carga do artigo, uma vez que, ou o efeito do artigo era a cerca de 20cm do solo (como é o caso do ensaio n.º 1), ou a ZL era diferente das restantes, como é o caso dos ensaios n.º 6, 7, 9 e 16, onde estes já se encontravam acima do nível do solo e o seu efeito era em direção ao solo.

Na Figura 13 são apresentadas as distâncias de cada partícula em relação à ZL, assim como, as distâncias que se referem na ficha técnica de cada artigo. A área a vermelho corresponde à distância de segurança a espaços florestais e a área a cinzento a distância a espaços com público. Em alguns casos, não se apresenta uma comparação relativa à distância de segurança recomendada dos artigos, uma vez que, estas devem ser definidas pelo operador pirotécnico.

Tabela 2 - Direção e velocidade do vento durante o ensaio, e altura máxima atingida para cada artigo.

N.º do Ensaio	Direção do vento	Velocidade do vento [km/h]	Altura do artigo [m]
1	WSW	4,8	-
2	WSW	2,4	44
3	SW	2,0	44
4	SW	1,8	102
5	SSW	1,3	26
6	SSW	1,3	-
7	WNW	1,1	-
8	WNW	2,3	98
9	S	1,8	-
10	SSE	2,4	84
11	W	2,4	58
12	W	2,4	89
13	NNW	2,7	98
14	SSE	0,7	133
15	SSE	0,7	122
16	SSW	1,3	-
17	WNW	3,0	57
18	NW	6,6	68
19	NW	6,6	57
20	NW	4,5	57
21	WNW	5,5	62
22	W	5,9	54
23	W	5,9	68
24	W	5,9	62
25	NW	6,4	74
26	NW	6,4	62
27	NW	7,4	114
28	NW	7,4	102

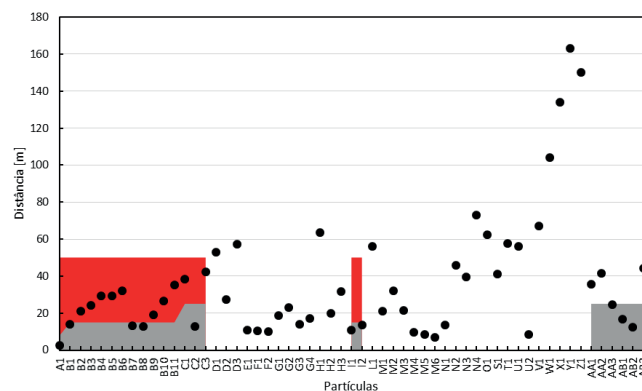


Figura 13 – Distância em relação à ZL para as partículas de cada artigo (pontos), distância de segurança à floresta (área a vermelho) e distância de segurança em relação ao público (área a cinzento).

Na figura é possível verificar que, das distâncias de segurança que foram identificadas relativamente à vegetação, as partículas desses artigos encontram-se dentro da zona definida como sendo de segurança. Desta forma, caso os operadores e as entidades sigam as instruções das fichas técnicas de cada artigo, a probabilidade de ocorrência de um IF é diminuta. Com base na análise dos ensaios realizados foi possível identificar os artigos que entendemos que não constituíam um perigo maior de incêndio:

- 1 – “Repuxo sem Fumo”, onde o artigo apresenta o seu efeito luminoso no local onde é disparado;
- 4 – “Foguetes - 3 tiros”, 10 – “Candela 30mm Multicolor (cometas)”, 11 – “Balona 50mm Peony,

12 – “Balona 75mm Peony”, 13 – “Balona 100mm Peony”, 14 – “Balona 125mm Peony”, 15 – “Balona 150mm Peony”, 18 – “Bateria 10/A”, 19 – “Bateria 5 Tiros”, 23 – “Balonas 5 Tiros 50mm”, 24 – “Balonas Bateria B4 75mm”, 25 – “Balonas Cargas C6 75mm”, 26 – “Balona Metralhadora M3 75mm” e 8 – “Foguete-Corpo rígido”, onde as partículas ao contactarem com o solo não tinham relevância térmica;

- 5 – “Vulcão 30mm Vermelho” e 17 – “Monótipo 2 – Morteiro”, não apresentaram qualquer partícula no solo.

4. Conclusões

Na realização do estudo e dos ensaios com os artigos pirotécnicos verificámos que a percentagem de IF correspondente ao uso de artigos pirotécnicos é muito reduzida bem como a área ardida resultante dos IF por eles causados. Constatámos ainda que essas percentagens sofreram um decréscimo devido às alterações introduzidas em 2006, com o DL n.º 124/2006, e a forma como os fabricantes conseguiram adaptar os artigos a esta legislação. A obrigatoriedade de licenciamento e da intervenção de operadores profissionais terá também contribuído para a redução da incidência de incêndios causados pelo emprego de artigos pirotécnicos, pelo que nos parece ser muito importante reforçar a sua obrigatoriedade. A percentagem de IF correspondente ao uso de artigos pirotécnicos foi inferior a 1% a partir de 2006 (cerca de 38 ocorrências por ano). A área ardida resultante desses IF foi inferior a 0,5% (com a exceção do IF do ano de 2015 do concelho de Miranda do Corvo, identificado com o código causa 133) o total da área ardida (cerca de 140 hectares por ano) por causas conhecidas, no mesmo período. Os artigos pirotécnicos têm riscos associados se não forem usados adequadamente, podendo, no limite conduzir à ignição de IF. A análise dos ensaios realizados permitiu identificar que os diferentes artigos pirotécnicos apresentam diferenças no potencial de causa de um IF. Assim, muitos dos perigos associados ao lançamento de artigos pirotécnicos podem ser

evitados tomando as medidas apropriadas para agir em caso de emergência e seguindo as recomendações das normas técnicas para o emprego de artigos pirotécnicos. Observámos que alguns artigos que têm pequenos efeitos luminosos apresentam baixo potencial de ignição de IF, não produzindo qualquer tipo de partícula suscetível vir a desencadear um IF a menos que haja um contacto direto com a vegetação envolvente. Por sua vez, outros artigos apesar de libertarem partículas, a capacidade de estas chegarem ao solo com relevância térmica para causar a ignição de um IF é de baixa probabilidade, se forem respeitadas as distâncias de segurança. Por último, existem artigos cuja utilização em condições de risco de incêndio diferente de baixo e se houver combustível disponível na proximidade do local de lançamento (caso não sejam cumpridas as distâncias de segurança recomendadas) poderão conduzir à ocorrência de um IF.

Em resumo, tendo em conta os artigos ensaiados, que são os mais utilizados pela indústria pirotécnica em Portugal, podemos afirmar que caso os operadores e as entidades sigam as instruções das fichas técnicas de cada artigo e a Norma Técnica n.º 3/2018, a probabilidade de ocorrência de um IF é diminuta, podendo ainda ser reduzida, conforme as recomendações apresentadas neste trabalho. Além disso, de acordo com a Norma Técnica n.º 3/2018 para a utilização de artigos pirotécnicos, todos os artigos ensaiados cumpriram as distâncias de segurança a espaços florestais definidas.

Este artigo é baseado no relatório geral de pirotecnia entregue às associações do setor dos explosivos e pirotecnia.

Referências

- How to Prevent Fires Caused by Fireworks. (n.d.). Retrieved April 12, 2019, from <https://www.jordanlaw.com/how-to-prevent-fires-caused-by-fireworks/>
- Norma Técnica n.º3/2018.pdf (2018). PSP.
- Relatório de Ensaios de Lançamento de Pirotecnia.pdf (2019). ADAI.
- Estudo emprego de artigos pirotécnicos.pdf (2019). ADAI.



Moura, Silva & Filhos, S.A

EXPLOSIVOS · PÓLVORAS · RASTILHOS



Conscientes de que o fabrico de explosivos é um sector de actividade que exige muito controlo e segurança, a Moura Silva & Filhos, SA, adoptou uma linha de estratégia para a progressiva melhoria, dando início em 1999 à implementação de um Sistema de Qualidade.

Um dos objectivos primordiais da empresa é o acompanhamento activo do progresso do mercado e a melhoria contínua do seu leque de produtos.

Pretende-se apoiar e servir todos os clientes com a máxima eficiência e brevidade e desenvolver um trabalho contínuo no desenvolvimento de novos explosivos. Na prática, todos os objectivos conduzem a um objecto fundamental a satisfação do cliente.

No seguimento dos seus objectivos, a Moura Silva & Filhos, SA, aposta neste momento na incorporação de quatro importantes factores: Qualidade, Ambiente, Segurança e Responsabilidade Social com o desenvolvimento do projecto de certificação integrada, sendo neste momento uma empresa certificada em Qualidade pela ISO 9001 e em Gestão Ambiental, pela 14001.

Com a conjugação destes quatro sistemas a Moura Silva & Filhos, SA, acredita ser possível avançar mais no seu caminho para a definição de um futuro em que seja possível, mais do que nunca:

"Fazer mais, com Qualidade"

"Fazer melhor, com segurança"

"Fazer bem respeitando o ambiente"

"Fazer de forma sustentada, com Responsabilidade Social"

O grupo Moura Silva & Filhos, S.A., ciente da permanente mutação do mercado nesta indústria, propõe-se enfrentar as mudanças de percurso que se perspectivam, tendo sempre em linha de conta, e acima de tudo, a satisfação do cliente.



Avaliação dos impactes ambientais de munições militares

Environmental impacts assessment of military ammunition

Carlos Ferreira, José Ribeiro

LAETA-ADAI; Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

(carlos.ferreira@dem.uc.pt; jose.baranda@dem.uc.pt)

As atividades militares têm associados diferentes tipos de impacto no ambiente e na saúde humana, portanto é importante a avaliação dos impactes ambientais de todo o ciclo de vida das munições militares. A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) permite que esses impactes ambientais, e o que está a contribuir para eles, sejam avaliados quantitativamente tendo em conta o ciclo de vida total (produção, uso, eliminação), além de permitir que se compare diferentes alternativas ou tecnologias para determinar qual a melhor opção em termos ambientais. Este artigo sumariza os principais resultados e conclusões depreendidas de diferentes estudos de ACV para munições militares. Esses estudos avaliaram os impactes ambientais e toxicológicos do ciclo de vida total das munições militares, isto é, foram quantificados quais os impactes associados à produção, uso e eliminação de munições militares. Estes estudos também demonstram a capacidade da metodologia de ACV para ser utilizada como ferramenta de ajuda à decisão.

Military activities pose different types of impacts on environment and human health, so it is important to assess the environmental impacts of the whole life-cycle of military ammunition. The Life-Cycle Assessment methodology (LCA) allows that those impacts, and what its contributing to them, to be quantitatively assessed considering all the life-cycle phases (production, use, and disposal). Furthermore, LCA studies allow to compare different alternatives or technologies in order to determine what is the appropriate option in an environmental perspective. This paper summarises the main results and conclusions drawn from different LCA studies for military ammunition. Those studies assessed the environmental and toxicological impacts associated with the whole life-cycle of ammunition, so the impacts from the production, use, and disposal of ammunition were quantified. These studies also demonstrated the feasibility of the LCA methodology to be used as a tool to help decision makers.

1 Introdução

Os impactes ambientais associados a munições têm sido desconsiderados pela população em geral ou mesmo pelas Forças Armadas devido ao seu uso em guerras ou outros cenários de conflito. No entanto, essa percepção pode mudar completamente se considerarmos que somente uma pequena percentagem das munições são usadas em teatros de guerra. De facto, a maioria das munições são utilizadas em treino ou são desmilitarizadas quando atingem o seu final de vida. Estas atividades contribuem para a contaminação dos solos, água, e ar através de emissões de metais e materiais energéticos, que, consequentemente, originam impactes nos ecossistemas e na saúde humana [1-4]. Além destas atividades, a produção das munições também apresenta certos problemas ambientais devido às emissões industriais, e consumo de materiais e energia [5]. De facto, as emissões de gases de efeito de estufa

resultantes unicamente do consumo de combustível pelos vários ramos das forças armadas americanas apresentam um impacto superior para as alterações climáticas do que as emissões de carbono totais de certos países, tais como Portugal, Suécia e Noruega [6, 7]. Portanto, é importante a avaliação dos impactes ambientais associadas às atividades militares, sendo que esta deve ser realizada tendo em conta todo o seu ciclo de vida.

A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) permite a quantificação dos impactes ambientais associados a todo o ciclo de vida das munições, isto é, desde a sua concepção e produção até ao seu final de vida. Ao longo dos últimos oito anos esta ferramenta tem sido aplicada às munições, sendo que este artigo pretende apresentar quais as principais conclusões que foram retiradas desses estudos para cada fase do ciclo de vida das munições (produção, uso e eliminação) e, ao mesmo tempo, demonstrar as

capacidades da metodologia de ACV para a melhoria ambiental das munições.

2 Avaliação de Ciclo de Vida

A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida segue o princípio de ciclo de vida, em que todas as fases do ciclo de vida são tratadas em cadeias de subsistemas que trocam entre si *inputs* e *outputs*, para quantificar os impactos ambientais de um produto ou sistema [8]. As fases de ciclo de vida são consideradas desde a extração de matérias primas, passando pela produção, uso e diferentes formas de eliminação (e.g. reciclagem, aterro, etc.), sendo denominado como uma análise *cradle-to-grave*.

Os princípios e requerimentos para a ACV são definidos pelas normas ISO 14040 [8] e ISO 14044 [9]. Nestas normas são apresentadas as quatro fases interrelacionadas da metodologia de ACV: definição de objetivo e âmbito; inventário de ciclo de vida; avaliação de impacto de ciclo de vida; e interpretação. A primeira fase inclui a definição do objetivo do estudo e o seu propósito, incluindo a definição das fronteiras dos sistemas (que fases do ciclo de vida de um produto são incluídas no estudo) e a unidade funcional. A seleção da unidade funcional é extremamente importante, sendo esta a referência que permite relacionar os fluxos de entrada e saída de um sistema. A unidade funcional descreve quantitativamente a função realizada pelo produto de forma neutra para garantir a qualidade e duração da função.

Na segunda fase da ACV (inventário de ciclo de vida) é feita a compilação de todos os fluxos de entrada e saída no sistema, ou seja, é realizada uma recolha de dados sobre os materiais, consumos de energia, emissões e resíduos que entrem e saiam das fronteiras de sistema.

Na avaliação de impacto de ciclo de vida são calculados os impactos ambientais associados aos dados recolhidos na fase anterior. Estes impactos podem ser calculados com o auxílio de diferentes, e por vezes complementares, métodos de avaliação de impacto. Alguns exemplos desses métodos são: os métodos CML e ReCiPe que determinam os impactos para diferentes categorias ambientais (e.g. aquecimento global, acidificação, depleção de recursos abióticos, eutrofização, etc.), o método USEtox que determina os impactos para categorias toxicológicas (e.g. saúde humana e ecossistemas), e o método CED que calcula a energia primária consumida.

Finalmente, na fase da interpretação os resultados são sumarizados e discutidos para formar conclusões,

recomendações e decisões de acordo com o que foi definido na fase da definição do objetivo e âmbito.

3. Impactes ambientais associados ao ciclo de vida das munições

Este capítulo apresenta os principais resultados e conclusões para os estudos realizados de ACV para munições. Foram realizados dois estudos sobre a produção e uso de munições. Um estudo determinou os impactos de uma munição genérica de 155 mm [10]. Os dados da sua produção são referentes a contactos com especialistas que forneceram os principais componentes de uma munição de 155 mm, enquanto os dados das emissões associadas ao disparo (combustão dos propérgios) e à detonação foram obtidos pela literatura [11, 12]. O outro estudo teve como objetivo a comparação de quatro balas de 9 mm, para determinar quais seriam as melhorias ambientais com a substituição de chumbo do projétil e do iniciador por um projétil feito de compósito nylon-cobre e um iniciador sem chumbo [13]. Neste caso, os dados da produção das balas foram obtidos diretamente pelo produtor das munições e os dados referentes ao uso das balas foram obtidos experimentalmente [14]. Para ambos os estudos a unidade funcional foi definida para uma munição (isto significa que os impactos ambientais calculados são referentes a uma munição).

Outros dois estudos centram-se na desmilitarização de munições. Num primeiro estudo foi calculado os impactos da desmilitarização de munições pela sua incineração em forno estático com o controlo das emissões diretas, sendo que os dados foram recolhidos na empresa idD [15]. O outro estudo foi realizado para determinar quais os potenciais benefícios da reciclagem do material energético de munições militares para o seu uso na produção de explosivos civis (emulsões explosivas) [16]. Para determinar estes benefícios foi necessário o cálculo dos impactos ambientais associados à produção da emulsão explosiva [17]. A unidade funcional foi definida como 1 kg TNT equivalente (TNTEq) em ambos os estudos da desmilitarização (portanto, os impactos ambientais são referentes à eliminação de 1 kg TNTEq. de material energético).

3.1 Impactes ambientais na produção

Os estudos realizados permitiram concluir que a produção das munições domina os impactos ambientais tendo em conta o impacto de ciclo de vida total das categorias ambientais (e.g. Aquecimento

Global, Depleção Abiótica, Acidificação, Eutrofização), como observado na Figura 1 e Figura 2. No caso da munição genérica (155 mm), a maioria dos impactes ambientais estão associados à produção dos materiais e componentes usados na munição, sendo esses a composição B e o aço utilizado no projétil (cerca de 40 % do impacto total) e a pólvora de base tripla usada (aproximadamente 45 % do impacto total) – Figura 1.

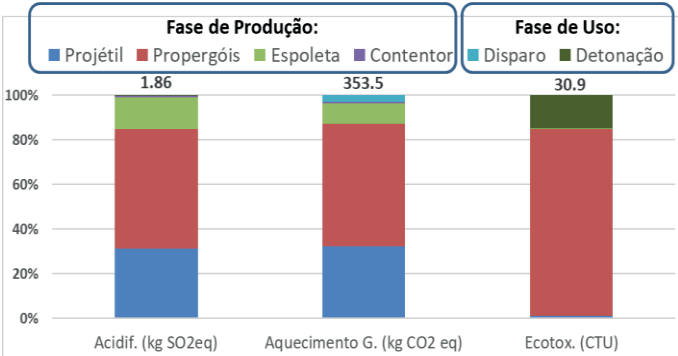


Figura 1 – Impactes totais associados às fases de produção e uso de uma munição de 155 mm para as categorias de impacto Acidificação, Aquecimento Global e Ecotoxicidade (adaptado de [10]).

No caso das quatro balas de 9 mm, os impactes das categorias ambientais estão associados ao consumo de energia na produção das balas e à produção dos componentes utilizados nas balas, principalmente os componentes do projétil (Figura 2). Também é observado que o latão usado no cartuxo apresenta impactes significativos para a categoria de impacto Eutrofização. É importante referir que a produção dos diferentes projeteis e iniciadores não apresentam diferenças significativas para os impactes das categorias ambientais.

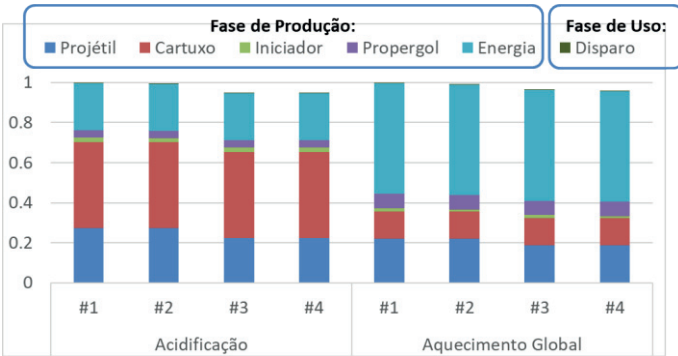


Figura 2 – Impactes totais associados às fases de produção e uso de quatro munições de 9 mm (#1 – projétil e iniciador de chumbo; #2 – projétil de chumbo e iniciador sem chumbo; #3 – projétil de compósito e iniciador com chumbo; #4 projétil de compósito e iniciador sem chumbo) para as categorias de impacto Acidificação e Aquecimento Global - (adaptado de [13]).

De referir que o estudo realizado para a produção da emulsão explosiva também demonstrou que os impactes das categorias ambientais são dominados pela produção dos principais componentes, principalmente os impactes associados à produção e transporte do nitrato de amónio que contribui aproximadamente com 70 % a 80 % para o impacto total [17].

4. Impactes ambientais no uso

Os impactes ambientais do uso das munições militares associados às emissões do disparo ou detonação contribuem principalmente para o impacto das categorias toxicológicas (toxicidade humana com efeitos cancerígenos e não cancerígenos, e ecotoxicidade). A Figura 3 demonstra os impactes toxicológicos para a munição de 155 mm, sendo que as emissões associadas à detonação contribuem para os impactes na saúde humana (80 % para efeitos cancerígenos e 95 % para efeitos não cancerígenos). Este resultado está associado às emissões de metais, nomeadamente emissões de cádmio, zinco, antimónio e cobre. As emissões associadas à combustão dos propergóis não apresentam um impacto significativo na saúde humana, devido à menor emissão de metais. Este estudo permitiu que fosse encontrado uma exceção em relação à contribuição das fases de ciclo de vida para o impacto total, pois os impactes da ecotoxicidade são dominados pela produção dos propergóis, em vez das emissões da detonação como seria expectável. Este resultado deve-se ao uso de pesticidas no cultivo de algodão que é a matéria prima na produção da nitrocelulose (composto usado na pólvora de base tripla). Estas emissões de pesticidas dominam os impactes na categoria de Ecotoxicidade. A determinação deste resultado demonstra a importância da utilização da metodologia de ACV para determinar os impactes ambientais das munições militares, pois através da sua abordagem holística permite incluir os impactes embutidos nos produtos ou sistemas que podem influenciar o impacto total de ciclo de vida.

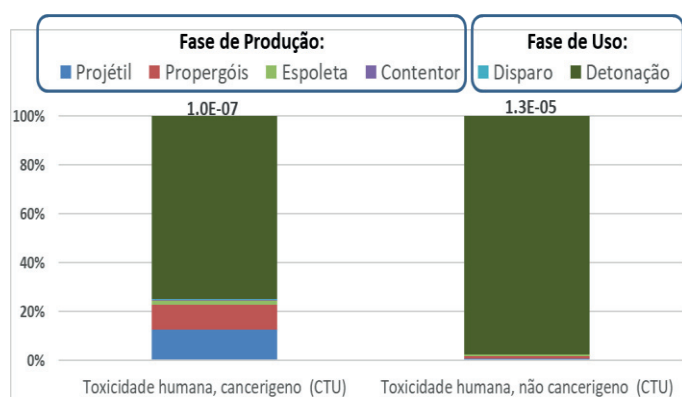


Figura 3 – Impactes totais associados às fases de produção e uso de uma munição de 155 mm para as categorias de Toxicidade Humana com efeitos cancerígenos e não cancerígenos (adaptado de [10]).

A comparação das quatro balas de 9 mm também demonstra que os impactes do uso têm uma maior contribuição para os impactes das categorias de toxicidade (Figura 4).

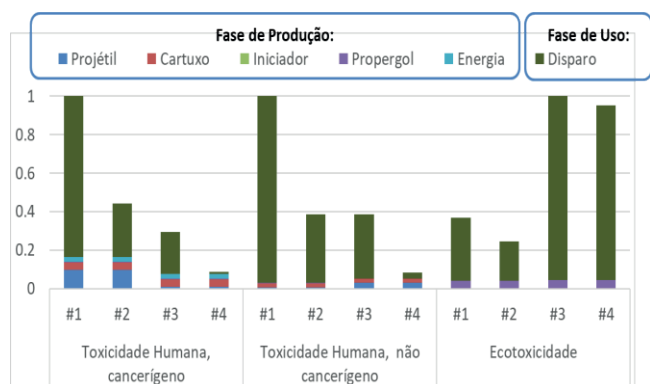


Figura 4 – Impactes totais associados às fases de produção e uso de quatro munições de 9 mm (#1 – projétil e iniciador de chumbo; #2 – projétil de chumbo e iniciador sem chumbo; #3 – projétil de compósito e iniciador com chumbo; #4 projétil de compósito e iniciador sem chumbo) para as categorias de Toxicidade Humana (com efeitos cancerígenos e não cancerígenos) e Ecotoxicidade - (adaptado de [13]).

Estes impactes toxicológicos, tal como na munição genérica, estão associados às emissões de metais. Para as categorias de toxicidade humana, os benefícios da substituição de chumbo são evidentes. Somente o uso de um iniciador sem chumbo diminui os impactes na saúde humana em aproximadamente 60 %. A bala sem chumbo no projétil e iniciador apresenta uma contribuição da fase de uso diminuta para o impacto total, sendo que a sua produção, neste caso, apresenta uma maior contribuição para o impacto total das categorias de toxicidade humana. Mais uma vez, a utilização de ACV permitiu observar um resultado imprevisto: as munições de compósito apresentam maiores impactes para a categoria de ecotoxicidade

que as munições de projétil com chumbo. As balas de compósito nylon-cobre apresentam maiores emissíveis de cobre o que contribui significativamente para os impactes nos ecossistemas. Portanto, este estudo permitiu concluir que seria necessário a utilização de um projétil com outro tipo de compósito para diminuir os impactes nos ecossistemas em relação às munições com chumbo.

5. Impactes ambientais no final de vida

As munições que atingem o seu final de vida ou se tornam obsoletas necessitam de ser destruídas num meio controlado, e com o menor impacto possível no ambiente. Com o objetivo de se conhecer quais os impactes ambientais associados à desmilitarização de munições militares, foram realizados dois estudos com diferentes tecnologias para eliminar as munições no seu final de vida: incineração em forno estático com controle das emissões; e reciclagem de material energético através da sua inclusão na produção de emulsão explosivas.

O primeiro estudo centrou-se na avaliação dos impactes ambientais associados à eliminação de munições militares através da sua incineração em forno estático, uma vez que este é o processo utilizado em Portugal. A Figura 5 mostra os impactes ambientais da incineração de munições em forno estático para as categorias Aquecimento global, Acidificação e Toxicidade humana. Foi permitido concluir que a maioria dos impactes ambientais está associado ao consumo de energia (eletricidade e propano), que é utilizado na operação do forno estático e também na operação dos vários equipamentos utilizados para a limpeza dos gases provenientes da incineração (*scrubbers*, câmara de pós-combustão, etc.), representado mais de 80 % para os impactes totais. Os consumos de energia são igualmente importantes para as categorias de toxicidade, uma vez que as emissões diretas da incineração são controladas. Este estudo demonstra que os impactes associados ao consumo energético é o preço a pagar para ter um impacto menor associado às emissões da incineração do material energético. As emissões diretas têm somente um impacto significativo para a categoria Aquecimento global (46 %), principalmente devido às emissões da queima do propano.

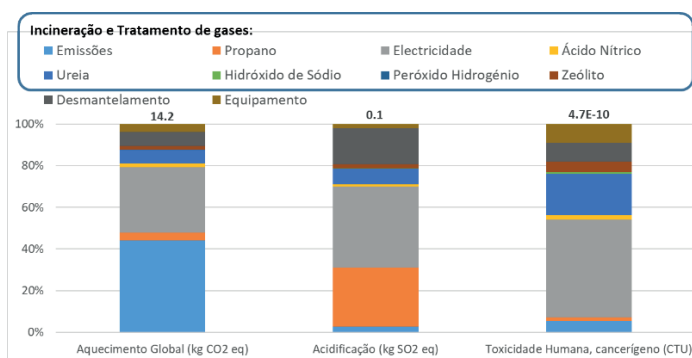


Figura 5 – Impactes associados à desmilitarização de 1 kg TNTeq. de material energético por incineração em forno estático para as categorias de Toxicidade Humana (com efeitos cancerígenos), Aquecimento Global e Acidificação - (adaptado de [15]).

Devido ao impacto ambiental associado à utilização de energia para a operação de incineração e tratamento dos gases de incineração, foi realizado um estudo para perceber quais seriam as vantagens da reciclagem do material energético para outros propósitos em vez da sua incineração [16]. Ao realizar a reciclagem do material energético, evita-se a sua incineração e consequentemente os impactes ambientais inerentes a este processo. Como o material energético irá substituir parcialmente parte da matriz da emulsão explosiva (e.g. nitrato de amónio, emulsificante, etc.), os impactes associados à produção e transporte destes componentes também serão evitados. Este estudo de ACV permitiu quantificar estes potenciais benefícios da reciclagem do material energético, evidenciando que a maior parte dos impactes ambientais e toxicológicos são diminuídos, em relação à desmilitarização por incineração em forno estático, em grande parte (aproximadamente 80 %) devido a evitar-se a incineração do material energético, mas também devido à substituição da matriz.

6. Conclusão

A aplicação da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida a munições militares ajudou a demonstrar que a avaliação quantitativa dos seus impactes ambientais é de extrema importância. Estes estudos demonstraram que, por vezes, aplicações de melhoria ambiental podem ter consequências inesperadas ao não ter uma abordagem de ciclo de vida. Além que estes estudos permitiram determinar quais os principais contribuidores para os impactes ambientais e, desta forma, recomendar tecnologias ou mudanças nos sistemas que possam diminuir ou mesmo mitigar esses impactes.

As conclusões retiradas destes estudos podem ser utilizadas por decisores, sejam eles oficiais que

utilizam e compram munições, produtores de munições e mesmo gestores de campos de tiro, para reconhecer quais os impactes ambientais e toxicológicos associados ao ciclo de vida total das munições e, assim, agir de forma a evitar futuros problemas ambientais.

Referências

1. Via SM, Zinnert JC (2016) Impacts of explosive compounds on vegetation: A need for community scale investigations, *Environmental Pollution* 208: 495 – 505.
2. Helander B, Axelsson J, Borg H, Holm K, Bignert A (2009) Ingestion of lead from ammunition and lead concentrations in white-tailed sea eagles (*Haliaeetus albicilla*) in Sweden, *Science of the Total Environ.* 407: 5555 – 5563.
3. Green RE, Pain DJ (2012) Potential health risks to adults and children in the UK from exposure to dietary lead in gamebirds shot with lead ammunition, *Food Chem. Toxicol.* 50: 4180–4190.
4. Francis RA (2011) The Impacts of Modern Warfare on Freshwater Ecosystems, *Environmental Management* 48: 985–999.
5. Pichtel J (2012) Distribution and Fate of Military Explosives and Propellants in Soil: A Review, *Applied and Environmental Soil Science* 2012: 1 – 33.
6. Crawford NC (2019), Pentagon Fuel Use, Climate Change, and the Costs of War, Boston University, 12 Junho.
7. Miguel Dantas, A “segurança perfeita” dos EUA está a conduzir-nos para um “precipício” ambiental, alerta investigadora. Disponível em <https://www.publico.pt/2019/06/21/p3/noticia/a-seguranca-perfeita-dos-eua-esta-a-conduzir-nos-para-um-precipicio-a-nivel-ambiental-alerta-investigadora-1876747>. Consultado a 21 de junho de 2019.
8. ISO (2006) ISO 14040: Environmental management – life cycle assessment - principles and framework, International Organization for Standardization, Geneva.
9. ISO (2006) ISO 14044: Environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines, International Standards Organization, Geneva.
10. Ferreira C, Ribeiro J, Almada S, Freire F (2017) Environmental Assessment of Ammunition: the Importance of a Life-Cycle Approach, *Propellants, Explosives and Pyrotechnics*, 42(1): 44 – 53.
11. Onasch TB, Wood EC, Timko MT, Owens KC, Beardsley HM, Kolb CE, Fortner EC, Knighton WB (2008) In Situ Characterization of Point-of-Discharge Fine Particulate Emissions, ESTCP Project WP-0420, Final Report, July.
12. U.S. Army Environmental Command (2009), Emission factors developed based on phase IX testing conducted at Dugway proving ground, Report on revisions to 5th edition AP-42 Chapter 15 – ordnance detonation, July, Utah, USA.

13. Ferreira C, Ribeiro J, Almada S, Rotariu T, Freire F (2016) Reducing impacts from ammunitions: A comparative life-cycle assessment of four types of 9 mm ammunitions, Science of the Total Environment 34-40: 566 – 567.
14. Rotariu T, Petre R, Zecheru T, Sucasca M, Petrea N, Sorin Eşanu S (2015) Comparative study of 9 × 19 mm ammunition combustion products and residues, Propellants, Explosives, Pyrotechnics 40: 931 – 937.

15. Ferreira C, Ribeiro J, Mendes R, Freire F (2013) Life-Cycle Assessment of Ammunition Demilitarization in a Static Kiln, Propellants Explos. Pyrotech. 38: 296 – 302.
16. Ferreira C, Ribeiro J, Roland C, Freire F, (2019) A Circular Economy Approach to Military Munitions: Valorization of Energetic Material from Ammunition Disposal through Incorporation in Civil Explosives. Sustainability 11, 255.
17. Ferreira C, Freire F, Ribeiro J, (2015) Life-cycle assessment of a civil explosive, Journal of Cleaner Production, 89: 159 – 164.



GJR – Pirotecnia e Explosivos, SA

Pólvoras | Explosivos | Acessórios | Serviços



fabrico



transporte



aplicação



medição



penafiel | gjr@gjr.pt

Controlo do desvio de furos através do uso de sensores eletrónicos: uma aproximação de Euler

Borehole deviation control using electronics: an Euler's approach

Vinicius Gouveia¹; Francisco Leite¹; Pedro Brito¹; Raquel Sobral¹; Alexandre Leite²

1 O-Pitblast, Lda; 2 Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Os resultados do desmonte de rocha com recurso a explosivo estão diretamente relacionados com a precisão da operação de perfuração e; por terem um efeito na fragmentação do material desmontado e na geometria das bancadas, nomeadamente na regularidade do piso destas, devem ser controlados para garantir uma maior produtividade global do processo extrativo, aumentar a segurança no trabalho e reduzir o impacto ambiental. O controlo da segurança é um dos fatores mais importantes quando se fala de desmonte de rocha, pois pode comprometer a segurança das equipas de trabalhadores e, eventualmente, as das comunidades vizinhas. Consequentemente, o controlo dos desvios dos furos para desmonte, afigura-se como uma das mais importantes operações para garantia da otimização dos desmontes em bancada. Devido aos avanços tecnológicos, hoje é possível construir um dispositivo de controlo de desvio de furos, com elevado grau de sofisticação, recorrendo a peças disponíveis no mercado; por essa razão, os autores decidiram avaliar a possibilidade de medir o desvio de furos através da criação de um protótipo portátil no qual se recorre ao uso de um sensor capaz de medir a aceleração nos objetos, conhecido como "acelerómetro" e, ainda, um microcontrolador para recolha e tratamento de dados. A principal ideia deste artigo é expor a validação das potencialidades do uso do método de Euler, dadas as limitações do passo do sensor e do microcontrolador, para reproduzir a forma do furo. Tendo em vista testar os resultados deste protótipo foram conduzidos ensaios no terreno, onde se compararam as medidas dos desvios de furo feitos por um equipamento tradicional com as do protótipo criado. Uma aplicação para telemóvel foi também desenvolvida para recuperar, tratar e exibir a informação para o utilizador. Para validar os dados obtidos utilizou-se uma análise de resíduos. Após análise e confirmação da eficácia do novo equipamento, os testes de normalidade provaram uma distribuição simétrica com média residual nula e variância mínima. Consequentemente, evidencia-se a eficácia deste novo dispositivo de medição dos desvios em furos. Assim, os autores aspiram a enfatizar o potencial deste recurso, quando aliado a um método numérico tradicional para análise do desvio do furo.

The consequences of rock blasting with explosives are directly related to the accuracy of drilling and, because they have an effect on fragmentation and ground level, they should be controlled to ensure a problem free production, increase work safety and reduce environment impact. Safety control is one of the most important processes in detonation, since it can compromise the worker security on site and, eventually, neighboring communities. Due to the technology advancements, it is possible to build a hole deviation control device with "of the shelf" parts, and for that reason the authors decided to evaluate the possibility of measuring hole deviation by creating a portable prototype using an electronic sensor capable of measuring the acceleration on objects, that is, to measure the own acceleration of a system, known as "accelerometer" and a micro-controller to handle and treat data. The main idea behind this paper is to validate the power of the Euler method, given the stepping limitations of the sensor and micro controller in order to reproduce of the hole shape. A case study was carried out, comparing the measurements of borehole deviations made by a traditional equipment and the prototype. A mobile application was also created in order to recover and treat and display the data to the user. For validation of the prototype, several holes were measured using the two devices. A residue analysis was used to validate the data obtained. After analyzing and confirming the effectiveness of the new equipment, the normality tests prove a symmetric distribution with null expected residual mean and minimum variance. Consequently, the accuracy of the prototype is evidenced. Thus, the authors aspire to emphasize the potential of using these sensors allied to a traditional numerical method for analysis of hole deviation.

1. Introdução

O desmonte otimizado de maciços rochosos com explosivos, tem como objetivo promover a fragmentação de uma determinada quantidade de rocha, associada a uma minimização dos respetivos custos operacionais. Este objetivo preside à maioria das operações mineiras de extração, bem como em muitas obras de escavação da área da engenharia civil. Por conseguinte, as condições em que o processo de desmonte se executa, irão afetar diretamente os resultados globais da operação (Bhandari, 1997). Para isto, a precisão de execução de em cada uma das etapas do desmonte para alcançar os objetivos planeados e, o conhecimento das características geomecânicas do maciço a desmontar, são essenciais para obtenção da fragmentação desejada (López Jimeno, López Jimeno, & Garcia Bermudes, 2017) e de uma geometria dos degraus de bancada o mais regular e próxima dos respetivos valores de projeto.

A operação de perfuração é um dos passos mais importantes deste processo. Consequentemente, o controlo e o conhecimento prévio dos resultados da perfuração são essenciais para prosseguir com o desmonte planeado, mantendo equilíbrio na parte económica, condição essencial e transversal a todo o ciclo de operações de mineração (Leite, Miranda, & Palangio, 2018). Chama-se de “desvio de perfuração” à ocorrência de um desvio não intencional da trajetória planeada para um determinado furo. Esse desvio do trajeto do furo pode ter como resultado, a geração de problemas, tais como um o custo elevado da perfuração, grau de fragmentação indesejado, projeção de fragmentos, irregularidades no piso de trabalho ou em rampas, danos nos equipamentos, entre outros (Harris, 1999). Além disso, a análise do

perfil do furo com o uso de equipamentos de medição de desvio, permite o controlo e minimização de geração de repés, sobreescavação, regularidade e estabilidade do talude (frente livre) e monitorização tendo em vista a otimização de toda a operação de desmonte (Miranda & Leite, 2018).

O foco deste projeto foi a pesquisa de um protótipo para a criação de um equipamento de medição do desvio de furos, nomeado de O-PitDev. A ideia principal deste trabalho foi validar a eficácia do método de Euler, a partir dos dados recolhidos dos sensores utilizados no equipamento, para a construção de um modelo digital da forma do furo. Foi levado a cabo um estudo de caso onde foram comparados os resultados das medições de desvio de furos realizados por equipamentos tradicionais e os resultados obtidos pelo O-PitDev. Esta operação de comparação foi concretizada através da utilização da Plataforma O-Pitblast que se encontrava instalada numa aplicação na qual se fez o controlo do equipamento. Para concretizar a validação dos resultados do protótipo, foi feita a medição de vários furos recorrendo, em cada um, ao uso dos dois equipamentos. Utilizou-se o método dos resíduos para validação dos dados obtidos e, depois da análise destes concluída, a eficácia do O-PitDev foi comprovada, considerando que os testes de normalidade demonstraram uma distribuição simétrica com uma média residual de zero e com variância mínima. Desta forma, os autores demonstram ao longo deste artigo, o potencial do uso destes sensores, quando aliados a um método numérico tradicional para promover a representação dos desvios de furos.



Figura 1 - Sistema O-PitDev desenvolvido.

Problemas de desvio

Para a maioria das operações onde tem lugar o desmonte de rocha com explosivos existe a necessidade de proteger o ambiente que as rodeia.

O desvio de perfuração pode originar vibrações, ruído, projeções, entre outros problemas que podem e devem ser evitados através de procedimentos de desmonte cuidadosos, que só se podem implementar com uma permanente aquisição e análise de dados.

Problemas de produção

A ocorrência de excesso de finos ou a presença de blocos de dimensões impróprias no grau de fragmentação do material desmontado, que irão exigir desmonte secundário, resultam quase sempre de um mau planeamento do projeto de desmonte ou de condições geológicas adversas não detetadas. Frentes livres muito irregulares ou graus de diluição do material indesejados são exemplos de problemas causados por perfuração irregular. O mesmo se passa quando ocorre sobreescavação causados por perfuração imprecisa (Bhandari, 1997).

Furos com desvio podem conduzir a má fragmentação, devido à ocorrência de valores de afastamento e espaçamento indesejados (inferiores ou superiores ao de projeto) ao longo do furo. Em relação a furos que se encontram posicionados perto da crista (primeira fiada), se as suas inclinações forem superiores à planeada, ocorrerá uma maior concentração de consumo específico de explosivo perto dessa crista e menor nas partes inferiores da bancada, circunstância que pode reduzir a eficácia do arranque de rocha pretendido originando a ocorrência de repés. Por outro lado, se a subperfuração é menor do que a projetada, devido aos erros da perfuração, a probabilidade de geração de repé aumenta, o que irá ocasionar custos indesejados nas operações subsequentes de carga e transporte do material empilha (López Jimeno, López Jimeno, & Garcia Bermudes, 2017).

Problemas de segurança

Um desmonte não controlado pode comprometer a viabilidade de um projeto, seja devido às queixas da comunidade, danos nas estruturas adjacentes que resultam em problemas jurídicos ou a colocação de vidas em risco. Erros de perfuração, como por exemplo, (subperfuração inferior ou superior à planeada, furos com afastamentos relativamente à frente livre diminutos ao longo do seu trajeto,) podem provocar um grau de fragmentação diminuto ao qual se podem associar fenómenos indesejados como

sejam, vibrações, onda aérea, gases tóxicos e projeções.

2. Medições de desvio

A necessidade de controlar os resultados obtidos em desmonte tem vindo a apresentar-se como essencial, tendo isso em mente, as empresas de extração mineira estão continuamente à procura de meios para aquisição de informação e melhorar os seus resultados. A medição do desvio de furos é um passo importante para essa melhoria e é por isso, que muitas empresas de desenvolvimento tecnológico estão a evoluir e a introduzir novos equipamentos no mercado. Neste capítulo, os autores vão dar alguns exemplos de equipamentos de medição de desvios em furos que são comuns utilizar no setor de extração mineira.

Equipamentos de medição

Existem diversos equipamentos com um objetivo comum: medição do desvio de furos. Como exemplo, descreveremos, muito sucintamente, o Blasthole Probe da Pulsar, o Boretrak (Rodded and Cabled) da Carlson e o telemóvel smartphone Android da O-Pitblast (Miranda & Leite, 2018).

Blasthole Probe

Esta ferramenta permite que o utilizador veja a inclinação, o azimute, a profundidade e a presença de água dos furos. O procedimento é simples: o operador desce a sonda e executa medições num intervalo definido por ele. Esta sonda apresenta-se com um guincho e um cabo ligados a ela. A exatidão deste dispositivo é $\pm 0,25^\circ$ para a inclinação e $\pm 1^\circ$ para o azimute (Ewer, 2018).

Rodded Boretrak

O Rodded Boretrak pode ser usado em maciços rochosos com minerais metálicos e é composto por barras que permitem que o operador meça o desvio do furo de metro em metro. Também pode ser usado em furos ascendentes, muito comuns em minas subterrâneas. Tem uma exatidão de $0,1^\circ$ e pode medir inclinações até 45° (Renishaw, 2017).

Cabled Boretrak

Este dispositivo tem uma metodologia de utilização diferente. Neste caso, o dispositivo de medida encontra-se anexado a um cabo que está assinalado de metro a metro. Este equipamento não pode ser usado em minas de extração minerais metálicos e apenas se

encontra preparado para furos descendentes. É composto por uma bússola digital e um sensor de inclinação de duplo eixo. A exatidão e as inclinações máximas são as mesmas que o Rodded Boretrak: 0,1° e 45°, respectivamente (Renishaw, 2017).



Figura 2 - Rodded Boretrak (à esquerda) e Cabled Boretrak (à direita).

Smartphone Android

Esta nova tecnologia, baseada num *smartphone*, apresentada pela O-Pitblast no Fragblast 12' (Miranda & Leite, The use of 3D accelerometers and gyro sensors in smartphones to measure the blasthole deviation in non-magnetic rock, 2018) é, aparentemente, menos complexa, mais fácil de usar e mais barata. A tecnologia usa o acelerómetro e o sensor magnético presente no Samsung Galaxy S8 para medir o desvio de furos. A operação do equipamento é feita através de duas aplicações onde o operador define o seu *offset* e o intervalo, em metros, em que ele pretende fazer as medições. No final, os dados de ambos os telemóveis são combinados, resultando num arquivo que contém a informação dos furos: número, inclinação e tempo de medição

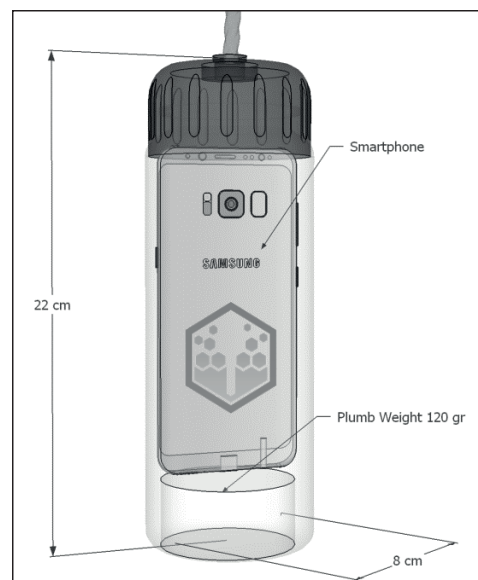


Figura 3 - Smartphone usado para medição dos furos.

3. Resultados das medições

Após os procedimentos de campo, seja através do uso do *smartphone* ou outro dispositivo com o mesmo propósito, o operador fica a conhecer a informação real da inclinação, azimute e profundidade do furo. Com essas informações e através do uso de um software de planeamento, desenho e otimização desmontes, como o O-Pitblast, é possível analisar diferentes situações/problemas, tais como:

- Perfis críticos: linhas demasiado perto/longe da frente livre;
- Afastamentos críticos;
- Riscos de projeção: furo não perfurado corretamente (inclinação/azimute errado) causando, assim, risco de projeções;
- Distribuição do afastamento;
- Valores de desvios;
- Ângulo real: possibilidade de ver se o furo planeado e o furo real apresentam o mesmo ângulo;
- Erro de repé: geração de repé devido a erros de perfuração.

Toda esta informação pode ser compilada e simulada como demonstra a Figura 4, onde o gradiente de cores diz ao utilizador que a primeira fila de furos está muito perto/longe da frente livre. Esta situação pode gerar projeções/baixo grau de fragmentação, anomalias que poderiam ser evitadas através das informações fornecidas pelos equipamentos de medição de furos, possibilitando, por exemplo, distribuir de forma discretizada, a carga explosiva ao longo dos furos.

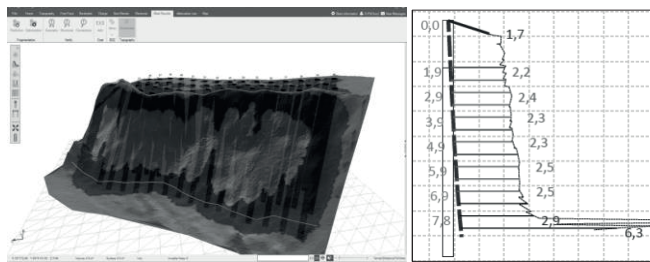


Figura 4 - Detecção do afastamento crítico (O-Pitblast).

4. Método de Euler

A construção de modelos digitais representativos das geometrias dos furos reais medidos, recorre a métodos numéricos que podem ser mais ou menos eficientes, nomeadamente no que diz respeito à velocidade de convergência para os pontos singulares da função objetivo.

Com o objetivo de corrigir problemas numéricos com o formato abaixo, Euler propôs uma solução baseada no conhecimento prévio sobre o comportamento da função (Butcher, 2003):

$$\begin{aligned} y'(t) &= f(t, y(t)), \\ y(t_0) &= y_0 \end{aligned} \quad \text{Equação 1}$$

Começando num ponto conhecido, a próxima iteração é aproximada à seguinte equação:

$$\begin{aligned} y(t_1) &\approx y_1 \\ &= y_0 + hf(t_0, y_0) \end{aligned} \quad \text{Equação 2}$$

Onde h é a dimensão do passo usado para cada medida.

A Figura 5 mostra a solução real para um exemplo genérico e a abordagem do método de Euler para diferentes passos (10 e 100 passos). Podemos observar que para valores mais altos do passo, a solução está mais perto do valor real.

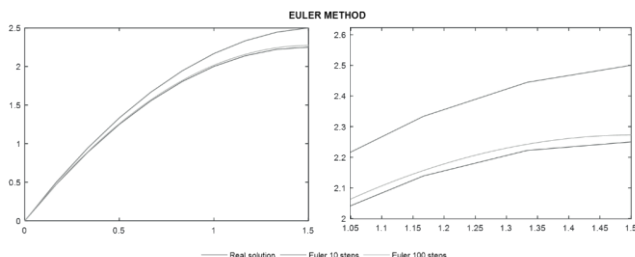


Figura 5 – Exemplo Método de Euler.

5. Metodologia

Aplicação para o smartphone

De forma a ser possível observar os resultados de campo imediatamente após as medições serem executadas, foi desenvolvida para esse fim uma aplicação para Android.

Esta aplicação funciona tanto com o método tradicional (medição de ângulo e azimuth, metro por metro) e com o método de Euler (medições da aceleração linear).

Depois de receber a informação, a aplicação calcula o perfil do furo e apresenta-o graficamente ao utilizador.

Componentes eletrónicos da sonda

Foi usado um microcontrolador ESP32 para esta pesquisa devido ao facto de este ser eficiente, rápido, e dispor de comunicação Bluetooth. Em conjunto com o microcontrolador foi utilizado o sensor BNO055 da Bosch Electronics. Este sensor oferece 9 DOF recorre a um acelerómetro, giroscópio e magnetómetro utilizando a comunicação I2C.

No método tradicional, é feita uma combinação dos três sensores para o cálculo da inclinação e do azimuth. Já no método de Euler, recorre-se a um procedimento de "fusão de sensores" chamado de "aceleração linear" com o propósito de subtrair a força da gravidade dos resultados finais. Foi usado um chip de memória interna de 4MB para a gravação destes dados. De acordo com as nossas expectativas, a gravação de 3 medições diferentes (x, y, z) a cada milissegundo, permitiria um armazenamento de apenas 5 minutos de medições.

Conexão

O Bluetooth foi escolhido como forma de comunicação entre a sonda e o telemóvel devido à sua ampla difusão e utilização (a maioria dos *smartphones* apresenta esta funcionalidade) e, para além disso, pelo facto da existência de um módulo Bluetooth no microcontrolador ESP32, referido anteriormente. A comunicação não é feita em tempo real porque a partir do momento em que a sonda é inserida no furo, esta perde o sinal. Dessa forma, a memória interna é usada enquanto a sonda se encontra dentro do furo. Os dados são transferidos de volta ao telemóvel assim que a sonda é novamente ligada.

Cápsula de proteção da sonda

Para a utilização dos sensores e da parte eletrónica, garantindo que estes permanecem intactos e funcionais durante a medição de cada furo, foi projetada uma cápsula de aço inoxidável AISI 304

(Figura 6). No planeamento da cápsula, descobriu-se que o aço inoxidável não isola a radiofrequência necessária para ser possível a comunicação dos dados entre o equipamento e os recetores instalados no PC e no telemóvel, tornando-se assim, dispensável a instalação de uma antena externa para conectividade entre ambos. Para além disso, a escolha do aço inoxidável deveu-se também à sua elevada resistência à corrosão, proporcionando assim, uma vida mais longa do equipamento, em comparação com outros materiais. Mas, apesar de esta ser a sua principal característica, existem várias outras vantagens ao recorrer ao uso do aço inoxidável (Frank, 2009), como:

- Resistência física (mecânica) igual ou superior ao aço comum;
- Facilidade de limpeza;
- Baixa tensão de superfície;
- Aparência higiénica;
- Material inerte (não reage ao contacto com outros materiais);
- Durabilidade elevada;
- Facilidade de moldagem e soldagem;
- Estabilidade a temperaturas extremas;
- Beleza visual (modernidade, limpeza e luminosidade);

- Equilibrada relação custo benefício;
- Material reciclável.

A cápsula de aço foi desenhada no software AutoDesk Inventor Professional e apresentou eficaz resistência à água que se encontrava presente em alguns furos, resistência ao impacto e atrito com as paredes do furo durante a descida e subida ao longo deste. A cápsula apresentou peso e densidade suficientes para ultrapassar a pressão exercida pelos líquidos presentes no furo, através da conceção de uma ponteira especial de aço inoxidável, material de densidade considerável ($7,85 \text{ g/cm}^3$) (Solução completa em Usinagem, 2018).

A ideia principal deste primeiro equipamento foi testar, no laboratório e no campo, os seus componentes eletrónicos, a conectividade, o sistema de aquisição de dados e a transmissão por radiofrequência. O cabo anexado ao protótipo foi marcado a cada metro para permitir a medição no interior dos furos em intervalos predefinidos pelo utilizador.

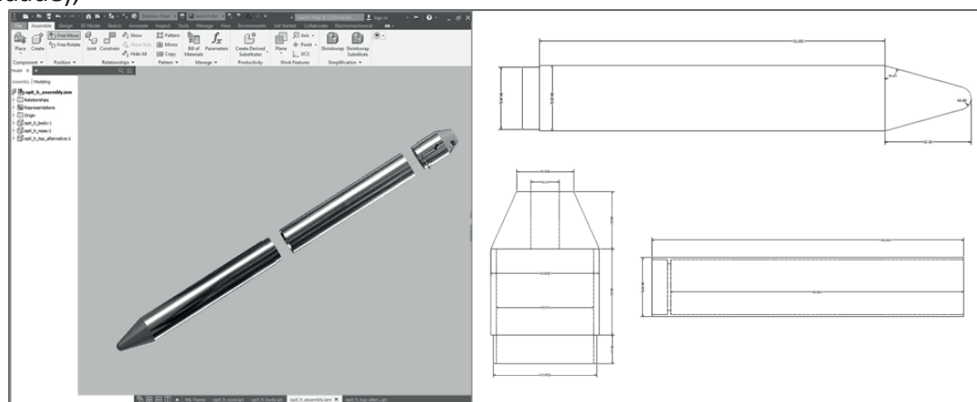


Figura 6 – Planeamento da cápsula inoxidável.

Procedimento de campo

Os testes de campo foram realizados na pedreira da Madalena (Vila Nova de Gaia – Portugal) explorada pela Empresa Solusel - Soc. Lusitana de Obras e Empreitadas, Lda.

Nesta pedreira, foi possível adquirir dados de furos no denominado Campo Experimental em Lavra de Minas (CELaMi) nela instalado em parceria com o Departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Os testes de campo incluíram:

- Scan da frente livre recorrendo ao uso de um drone;

- Registo da posição dos furos;
- Medição do perfil do furo com um *Cabled Boretrak*;
- Medição do perfil do furo com a metodologia desenvolvida:
 - Colocação do *O-PitDev* no fundo do furo;
 - Medição do *offset*;
 - Gravação do primeiro tempo (da primeira medida no fundo do furo);
 - Subida da sonda até que à boca do furo com paragens de metro em

- metro e recolha dos tempos a cada uma dessas interrupções;
- Combinação de ambas as informações da aplicação do telemóvel com a informação da sonda - tempo, ângulo e azimuth.

Análise de dados

Foram feitas várias medidas, dentro do furo, em diferentes posições. Antes de se descer o equipamento no furo, definiu-se um intervalo – uma medida a cada metro. No caso de o furo apresentar um comprimento que não seja múltiplo do intervalo definido, esta diferença é, geralmente, intitulada de *offset*. As outras medidas terão uma diferença igual ao intervalo adotado (Miranda & Leite, 2018).

6. Resultados

Os autores depararam-se com algumas restrições (pelo menos nesta primeira abordagem) ao utilizar a metodologia de Euler devido às limitações da taxa de amostragem (Figura 7). Foi possível obter a leitura de 300 amostras/segundo, o que é um número baixo para se tentar detetar o deslocamento da aceleração (aplicando o método de Euler duas vezes).

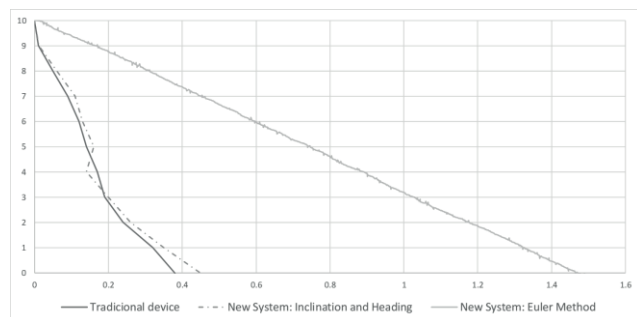


Figura 7 - Comparação entre a metodologia de Euler: azimuth e inclinação (equipamento tradicional e novo equipamento).

Visualmente os resultados são bastante semelhantes, como é possível observar na Figura 8 (através do uso da inclinação e azimuth em cada metro).

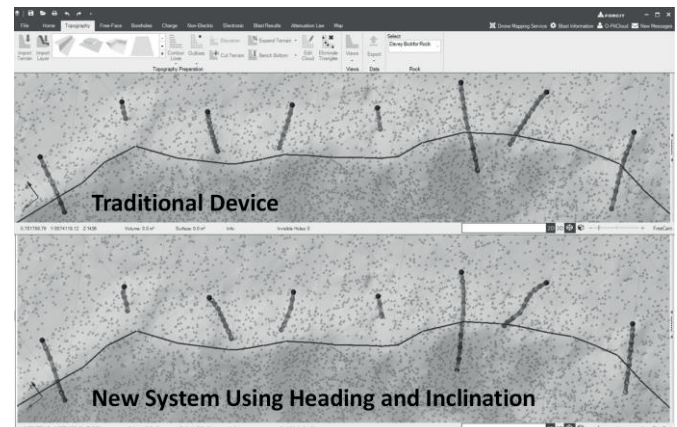


Figura 8 - Comparação dos equipamentos utilizando o azimuth e inclinação.

Análise estatística

Fazendo uma análise ao resíduo entre os dois resultados (medição com o equipamento tradicional e o desenvolvido pelos autores), e através do uso da inclinação e do azimuth, os dados demonstram que os resultados dos dois tipos de equipamento são equivalentes:

- *P-Value* mostra que a hipótese nula deve ser aceite (Shapiro-Wilk com 95% de nível de confiança) - Figura 9 o que significa que os dados seguem uma distribuição normal;
- O zero está dentro do intervalo de confiança.

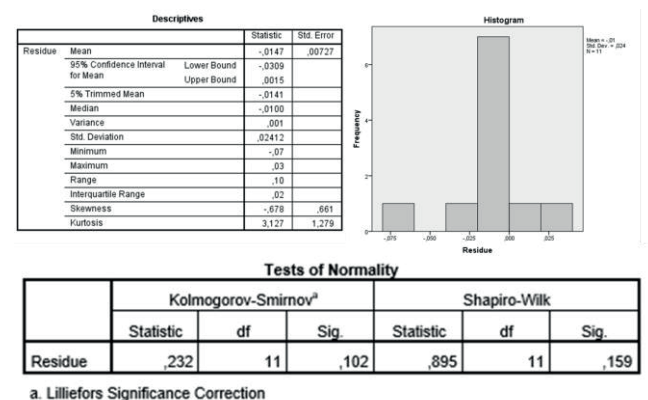


Figura 9 - Resultados estatísticos.

Desenvolvimento e limitação

Para além dos excelentes resultados apresentados por esta pesquisa, os autores encontram-se num permanente processo de procura da melhoria do protótipo em desenvolvimento, nomeadamente no que diz respeito a ajustes na cápsula e no sistema eletrónico para proporcionar uma melhor performance da sua utilização por parte dos operadores. Prevê-se diminuir o peso da sonda, reestruturar a aplicação e melhorar a conectividade.

Este protótipo está limitado ao uso exclusivo em maciços rochosos sem minerais metálicos devido à possível interferência destes com o sensor magnético nele existente.

7. Conclusões

Os autores depararam-se com algumas restrições relativas ao método de Euler. Como atrás mencionado, através do aumento da taxa de amostragem, torna-se possível obter melhores resultados. Durante esta pesquisa, devido à limitação dos sensores utilizados, não foi possível obter a melhor solução. No entanto, os resultados obtidos ao utilizar os valores do azimute e da inclinação com este protótipo, são extremamente interessantes. A capacidade de reproduzir os resultados obtidos com recurso a um dispositivo com significativo menor custo, irá abrir novas portas para que pequenas e médias empresas possam passar a controlar a precisão da perfuração, melhorando, assim, a segurança e a produtividade das operações de desmonte e suas subseqüentes. Por outro lado, este produto permite uma aquisição rápida de dados devido fácil acesso à informação através da aplicação para o telemóvel. O estudo de caso realizado é muito claro ao evidenciar uma correlação direta entre o método convencional e este novo, comprovando assim a qualidade da metodologia apresentada. O equipamento é prático, a formação exigida para o seu uso com eficácia é mínima e a integração com *smartphones* potencia o uso da tecnologia nas operações de desmonte, economizando tempo, minimizando custos e criando oportunidades de deteção e eliminação de variadíssimos problemas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos Engenheiro José Cardoso Guedes e João Fernandes, pela oportunidade de realizar este projeto na pedreira da Madalena. Reconhecer a Engenheira Raquel Sobral (Engenheira dos Serviços Técnicos da O-Pitblast) pelo apoio notável nos procedimentos de campo, paciência, e excelente trabalho sobre o controlo de qualidade da aplicação. Gostaríamos também de agradecer à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), especialmente ao Professor Alexandre Leite e à Universidade Federal de Pernambuco (UFP), particularmente ao Professor José Carlos. Um agradecimento especial à Rosa e à Carolina pela paciência.

Referências

- Bhandari, S. (1997). *Engineering Rock Blasting Operations*. Rotterdam Brookfield: A.A.Balkema.
- Butcher, J. C. (2003). *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*. New York: John Wiley & Sons.
- Dowding, C. H. (1985). *Blast Vibration Monitoring and Control*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc.
- Ewer, M. (2018, July 7). *PULSAR MEASURING SYSTEMS LTD*. From <http://www.pulsarmeasuring.co.uk/>
- Frank, G. (2009). *Análise Econômica do Alumínio*. Recife, Brazil: UFPE.
- Gujarati, D., & Porter, D. (2010). *Econometria*. México: McGraw-Hill.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2008). *Fundamentos de Física. Volume 1*. Rio de Janeiro.
- Hamming, R. (1973). *Numerical Methods for Scientist and Engineers*. New York: McGraw-Hill.
- Harris, J. E. (1999, Mar 12/08/2017). Drill Accuracy. *ISEE: International Society of Explosives Engineers*. From www.support.apple.com: https://support.apple.com/kb/SP685?locale=pt_PT&viewlocale=es_ES
- Hustrulid, W. (1999). *Blast Principles for Open Pit Mining*. Rotterdam Brookfield: A.A.Balkema.
- Instantel. (2016). Minimate Pro 6. Ottawa, Ontario, Canada.
- ISEE. (2015). *ISEE Field Practice Guidelines For Blasting Seismographs 2015*. Cleveland, Ohio USA: ISEE.
- Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. Rotterdam Brookfield: A.A.Balkema.
- Konya, C. J., & Walter, E. J. (1990). *Surface Blast Design*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Lashinsky, A. (2012). *Inside Apple: How America's Most Admired--and Secretive--Company Really Works*. Business Plus; First Edition edition.
- Leite, F., Miranda, V., & Palangio, T. (2018). Pattern Expansion Optimization Model Based on Fragmentation Analysis With Drone Technology. *Proceedings of the Forty-Four Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*. San Antonio, Texas USA: International Society Of Explosives Engineers.
- López Jimeno, C., López Jimeno, E., & Garcia Bermudes, P. (2017). *Manual de Perforación, Explosivos y Voladuras*. Madrid: ETSI Minas y Energía - Universidade Politécnica de Madrid.
- Miranda, V. (2016). Validação de Modelos Lineares: Uma Análise Residual. Porto, Portugal.
- Miranda, V., & Leite, F. (2018). The use of 3D accelerometers and gyro sensors in smartphones to

measure the blasthole deviation in non-magnetic rock. In H. Schunnesson, & D. Johansson, *12th International Symposium on Rock Fragmentation By Blasting* (pp. 211-221). Lulea, Sweden: Lulea University of Technology, Sweden - Division of Mining and Rock Engineering.

Miranda, V., Leite, F., & Frank, G. (2017, September). Blast Pattern Expansion - A numerical Approach. *EFEE 9th World Conference*. Stockholm: EFEE.

Miranda, V., Leite, F., Jesus, C., & Sobral, R. (2017). A new Approach to 3D Modeling of Blast Free Faces. *International Society of Explosives Engineers - 43rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique - Orlando, Florida, USA*.

Miranda, V., Leite, F., Jesus, C., & Sobral, R. (2017). A New Blast Vibrations Analysis Methodology. *International Society of Explosives Engineers - 43rd Annual Conference on Explosives & Blasting Technique - Orlando, Florida, USA*.

Novales Cinca, A. (1993). *Econometría*. Madrid: McGraw-Hill.

Oriard, L. L. (1999). The Effects of Vibration and Environmental Forces. *International Society of Explosives Engineers*.

Performance Specifications For Blasting Seismographs. (2016). In S. Committee. International Society of Explosives Engineers (ISEE).

Renishaw. (2017). *Rodded Boretrak and Cabled Boretrak*.

Sanchidrián, J. A., & Muñiz, E. (2000). *Curso de Tecnología de Explosivos*. Madrid: Fundación Gomez Pardo - Universidade Politécnica de Madrid (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas).

Siskind, D. E. (2005). *Vibration From Blasting*. Cleveland: International Society of Explosives Engineers.

Solução completa em Usinagem. (2018, July 20). From EuroAktion: <http://www.euroaktion.com.br/Tabela%20de%20Densidade%20dos%20Materiais.pdf>

STMicroelectronics. (n.d.). AN2960 Datasheet - STMicroelectronics. AN2960. <http://www.st.com>.



PROPYRO - Produtos Pirotécnicos, Lda.

📍 Morada: Rua das Sete-Fontes 44, 3060-472 Ourentã (Cantanhede) | Alvará nº8/2012
 📍 Paiol: Lugar de Cabeços – Mogo de Ansaes, Carrazeda de Ansiães | Carta Estanqueiro nº 323
 ☎ Telefone: (+351) 231 419 010 | ✉ E-mail: info@propyro.pt | www.propyro.pt

Field-testing of the prototype FRAGTrack™ Mobile and comparison with empirical fragmentation models

Testes de campo do protótipo FRAGTrack™ Mobile e comparação com modelos de fragmentação empíricos

Francisco Brandão de Brito Guimarães Marques (franciscobbm@gmail.com)

O objetivo deste estudo consistiu em testes ao FRAGTrack™ Mobile em cenários operacionais variados e na comparação dos resultados com os modelos empíricos de previsão granulométrica associados ao desmonte de rocha com explosivos, nomeadamente o de Kuz-Ram Modificado e o de KCO. O FRAGTrack™ Mobile é um protótipo em fase alfa e foi desenvolvido pela Orica Limited, permitindo a captação e análise de imagens estéreo. Este protótipo permite a captura *in situ* de imagens da pilha de desmonte e uma posterior reprodução da respetiva curva granulométrica, essencial para a otimização das operações unitárias mineiras. Este estudo está organizado em três secções: garantir o correto funcionamento básico do sistema, analisar a eficácia do sistema num contexto de otimização do diagrama de fogo (da qual iria resultar um aumento subtil da fragmentação) e, por último, analisar o funcionamento e a eficácia do sistema em diferentes cenários operacionais. Nas duas últimas secções, os resultados são comparados aos modelos de Kuz-Ram Modificado e de KCO através de parâmetros de desvios relativos médios, tais como o Erro Absoluto Percentual Médio. Deste modo, foram obtidos pelo FRAGTrack™ Mobile resultados muito semelhantes aos oferecidos pelos modelos de previsão empírica em cenários operacionais nos quais estes modelos são considerados como sendo extremamente precisos. Estes resultados são demonstrativos do potencial deste protótipo.

The objective of this work is to test the FRAGTrack™ Mobile in various operational scenarios and to compare its results with the Modified Kuz-Ram and KCO empirical blasting fragmentation prediction methods. The FRAGTrack™ Mobile unit is a portable, stereo image analysis alpha prototype developed by Orica Limited. It allows users to capture images of in situ muck pile rock fragmentation and automatically analyse those to produce the projected area size distribution. Fragmentation assessment is essential for both blasting and for downstream mining operation optimization. This work is organized in three main sections: ascertaining the basic functioning of the prototype, testing its preciseness in one specific blast design optimization (in which the proposed solutions would guarantee a subtle improvement in fragmentation) and, lastly, testing its correct functioning and usefulness in various operational scenarios. In the last two sections, the results were compared to the Modified Kuz-Ram and KCO models through average relative error parameters such as the Mean Absolute Percentage Error. From this and in scenarios which the models guarantee exceptionally precise predictions, very small errors were obtained from the FRAGTrack™ Mobile. These results are proof of the prototype's potential.

1. Introduction

Generally, the mining operational cycle is roughly the same throughout the industry: drilling, blasting, loading, hauling and crushing. Size reduction of run-of-mine rock or comminution is a priority in the mining operations while also representing a large portion of mining operating expenses (Rothery & Mellor, 2007). By opposition, rock blasting is relatively cheap, and its primary objective is to attain a successful fragmentation, which affects all downstream operations and can be used to minimize these costs (Dinis da Gama & Jimeno, 1993).

On that account, a rapid and reliable technique for assessing the degree of fragmentation is essential for accurate quality control and optimization of the mining process. Several methods of particle size distribution estimation exist but the most used are sieving, observation, empirical, and image analysis methods; all of these have notable upsides and downsides (Sudhakar, 2006). From these, empirical methods are mostly mathematical or statistical models that do not assess but predict the size distribution of blasted rock based on the blasting and geomechanical parameters (Sereshki, Hoseini, & Ataei, 2016); these methods

provide predictable results to which other methods can be compared with, despite being linear and not entirely accurate (Jahani & Taji, 2015). Besides this, image analysis methods make swift and relatively accurate blast fragmentation distribution assessment possible, having become the industry's main tools for fragmentation assessment (Bamford, Esmaeili, & Schoellig, 2017); the downside of this type of technology, according to Thurley (2013), lies in the quality of the results (stemming from the errors consequential to the complexity of the method), and in their subjectivity (regarding what is required from the user to counter these errors and in the power that it gives to the user).

It is in this context that the FRAGTrack™ Mobile appears. The FRAGTrack™ Mobile unit is a newly developed portable image analysis camera system and complementing software developed by Orica Limited. It allows users to automatically capture and analyse images of *in situ* rock fragmentation to produce the projected area size distribution. The FRAGTrack™ Mobile unit (Figure 1) encompasses three main elements: a battery-powered binocular stereo portable camera system, an extensible carbon fibre monopole to hold the camera, and a small sturdy tablet lodging the software.



Figure 1 - Top, the three main elements of the FRAGTrack™ Mobile prototype—the carbon monopole with the camera mount head, the MESA² tablet with its cradle and attachment to the monopole and the FRAGTrack™ Mobile camera unit; Bottom, the binocular FRAGTrack™ Mobile camera unit.

This software is employed to control the camera settings and therefore adjust the automatic image

acquisition profile (which will determine the trigger conditions because it imposes *a priori* image quality conditions to an image sampling operation, therefore reducing user influence). Additionally, it is capable of automatic image processing (according to user-selected, software-predefined, expected particle size range) and subsequent result display.

2. Methodology

The testing methodology of the FRAGTrack™ Mobile will be presented in this section, a prototype in an alpha stage of development. Therefore, it is necessary to ascertain that the equipment functions in diverse operational scenarios. In this scope, the FRAGTrack™ Mobile prototype testing methodology was divided into three subsections: basic functionalities testing, “intraquarry” testing and “interquarry” testing.

2.1 Basic Functionalities testing

This subsection focuses on the correct functioning of the prototype's indispensable functions, encompassing both hardware and software functions, including: availability of all the components, mechanical coupling of the various pieces, battery, software installation, camera/tablet Wi-Fi connection bridge establishment, GPS integration, camera display on screen, measured distance to the muck pile, automatic image acquisition profile, automatic image acquisition, image transfer from camera to tablet, image processing (of both individual images and image sets), result files creation and display, ventilation capacity and temperature adjustment capacity. In this testing phase, accurate processing and analysis of images sampled from graded rock was performed in the *Pedreira do Calhariz* quarry.

2.2 Intraquarry testing

This subsection focuses on the accurate and precise functioning of the equipment. For this purpose, the prototype was used in a blast design optimization application in which the blast design options were predetermined to guarantee that a subtle but noticeable fragmentation improvement would occur.

The blast optimization process was called the “Cheap Rock” project at the Cimpor Alhandra limestone aggregate quarry and had for goal the optimization of the blasting operation, mainly by reducing the amount of boulders in the inefficient blasting design, hereafter designated as the reference situation. The Cheap Rock Project process proposes two alternative solutions: increasing the explosive charge height (and, thus, the

amount of explosive) or introducing a pocket charge in the stemming material.

Image sampling was carried in the laterally dug exposed portions of the muck piles, the active rill, mainly to diminish the size segregation error (Thurley, 2013). Imaging was done by walking along the front of the exposed rill surface and using the monopole to elevate the FRAGTrack™ camera unit above and perpendicularly to the rill surface. Ideally, one should attempt to capture images over the entire exposed surface of the pile in one continuous section to ensure that the results are not biased by omission or by repetition. Additionally, images were sampled at noon, while the sun is at its zenith, to guarantee that shadows and direct sunlight interfered as little as possible.

The image processing of the sampled images was much simpler, as it is without a doubt one of the advantages this prototype offers. The prototype offers the possibility of processing each image individually according to a selected processing “bin size” (from “very fine” to “oversized” fragments) guiding the edge detection delineation software according to the perceived particle distribution of the fragments in the image(s). Special attention in the processing phase was given to the correct delineation of boulders without affecting the fine portion of fragments as much as possible. After every image has been processed, the blast average distribution curve was plotted.

These average results were compared with two empirical methods of predicting fragmentation, namely the Modified Kuz-Ram model and the KCO model. Cunningham developed the Modified Kuz-Ram (Cunningham, 1987), now known as the Kuz-Ram model. The Kuz-Ram model has been and is used as a common—if not the most common—model in the mining industry for predicting rock fragmentation size distribution by blasting (Gheibie, Aghababaei, Hoseinie, & Pourrahimian, 2009). It starts by predicting the median fragment size as displayed in Equation 1.

$$x_{50} = A \times \left(\frac{V}{Q}\right)^{0.8} \times Q^{\left(\frac{1}{6}\right)} \times \left(\frac{115}{S_{ANFO}}\right)^{\frac{19}{30}} \quad (1)$$

Where x_{50} is the median fragment size (cm), V is the rock volume blasted per hole (m^3), S_{ANFO} is the relative weight strength of an explosive when compared to ANFO, in which TNT is 115 (since ANFO is equal to 100) and Q is the mass of explosive per hole (kg). A is the rock factor, given by an adaptation of the Blastability

Index proposed by Lilly (1986), seen in Equation 2 (Gheibie, Aghababaei, Hoseinie, & Pourrahimian, 2009).

$$A = 0,06 \times (RMD + RDI + HF) \quad (2)$$

Where RMD is the Rock Mass Description, RDI is the Rock Density Influence and HF is the Hardness Factor.

The Kuz-Ram uses the Rosin-Rammler distribution to plot the remaining particle size distribution (Rosin & Rammler, 1933), sometimes called 2-parameter Weibull, given in Equation 3(3) (Kulatilake, Qiong, Hudaverdi, & Kuzu, 2010).

$$P(x) = \left(1 - e^{-0,693\left(\frac{x}{x_{50}}\right)^n}\right) \times 100 \quad (3)$$

Where $P(x)$ is the fraction (%) for which size is less than some specific value x , x is the diameter of a fragment (cm), and n is the uniformity exponent (or index of uniformity), which is given in Equation 4 if the hole is loaded two types of explosives, as was always the case.

$$n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{\phi_h}\right) \left(\frac{1}{2} + \frac{S}{2B}\right)^{0,5} \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\frac{L}{H}\right) \left(0,1 + \left|\frac{BCL - CCL}{L}\right|\right)^{0,1} \quad (4)$$

Where B is the hole burden (m), S is the spacing between holes (m), ϕ_h is the hole diameter (mm), W is the standard deviation of drilling accuracy (m), L is the total charge length (m), H is the bench height (m), and BCL and CCL are the bottom charge and the column charge length (m), respectively (Gheibie, Aghababaei, Hoseinie, & Pourrahimian, 2009).

Although the Kuz-Ram model has been used broadly, it has some deficiencies like all models are bound to have, such as an underestimation of fines (Hall & Brunton, 2002) and an overestimation of large boulders, both weaknesses offered by the Rosin-Rammler distribution (Ouchterlony, Sanchidrián, & Moser, 2017).

These issues were addressed by replacing this distribution by the Swebrec distribution (Ouchterlony, 2005), therefore creating the KCO model (Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony). The Swebrec distribution, displayed in Equation 5, effectively diminishes the two above stated drawbacks and seems to be the new staple in the industry for predicting fragmentation. Even though the KCO model is by far more accurate

(especially in the fines range) of the two, comparison with the Kuz-Ram model can be seen as useful mainly because the Kuz-Ram model is very well-established.

$$P(x) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{x_{max}}{x}\right)}{\ln\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right)} \right]^b} \times 100 \quad (5)$$

Where x_{max} is the maximum fragment size (Equation 6), b is a curve-undulation parameter (Equation 7) and x_{50} is the median fragment size (Equation 8).

$$x_{max} = \min(S_f, S, B) \quad (6)$$

Where S_f is the *in situ* block size determined by the narrowest fracture or discontinuity family (Ouchterlony, 2005). The curve-undulation parameter is:

$$b = n \left(2 \times \ln(2) \times \ln\left(\frac{x_{max}}{x_{50}}\right) \right) \quad (7)$$

Where n is still the index of uniformity of the Kuz-Ram model (Equation 4).

$$x_{50} = A \times q^{-0.8} \times Q^{\frac{1}{6}} \times \left(\frac{115}{S_{ANFO}} \right)^{\frac{19}{30}} \quad (8)$$

Where q is the specific charge (kg/m³), seen in Equation 9.

$$q = \frac{(BCL \times \rho_{exploive(BC)} + CCL \times \rho_{exploive(CC)}) \times \pi \times \phi_h^2}{4 \times B \times S \times H \times \sin \alpha} \quad (9)$$

Where $\rho_{exploive(BC)}$ and $\rho_{exploive(CC)}$ are respectively the bottom charge and the column charge explosive density (kg/m³), ϕ_h is the hole diameter and α is the hole inclination (in degrees to the vertical) (Ouchterlony, 2005).

For each blast, both empirical models were compared to the FRAGTrack™ results through statistical means (Statistics: How To, 2016) displayed in Equation 10 to 19, considering the error as the difference from each empirical model to FRAGTrack™ data. The quartile distribution, weighted average and the Interquartile Range are also useful for describing the curves' progression.

$$Error_i = x_{i,model} - x_{i,FRAGTrack} \quad (10)$$

$$Absolute\ Error_i = |Error_i| \quad (11)$$

$$Square\ Error_i = Error_i^2 \quad (12)$$

$$Absolute\ Error\ Divided\ by\ Actual\ Value = \frac{|Error|_i}{x_i} \quad (13)$$

$$Mean\ Absolute\ Deviation = MAD = \frac{1}{n} \sum_{x_i=1}^n |Error|_i \quad (14)$$

$$Mean\ Square\ Error = MSE = \frac{1}{n} \sum_{x_i=1}^n Error_i^2 \quad (15)$$

$$Root\ Mean\ Square\ Error = RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x_i=1}^n Error_i^2} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Mean\ Absolute\ Percentage\ Error &= MAPE \\ &= 100 \times \frac{1}{n} \sum_{x_i=1}^n \frac{|Error|_i}{x_i} \end{aligned} \quad (17)$$

$$Weighted\ Average = \sum_{x_i=1}^n x_i \times p(x_i) \quad (18)$$

$$Interquartile\ Range = IQR = d_{75} - d_{25} \quad (19)$$

2.3 Interquarry testing

This subsection focuses on the correct functioning and usefulness in various operational scenarios. For this purpose, the equipment was subjected to the widest variation of possible locations by bringing the FRAGTrack™ Mobile to as many different quarries as possible; therefore, being an “interquarry” testing.

The visited locations were the *Pedreira Do Calcário* quarry, the *Pedreira do Sicó* quarry and the *Portela nº7* quarry (all limestone quarries but with enough geological differences between them to remain interesting). Otherwise, the methodology remains the same as in the last subsection.

3. Results

3.1 Basic Functionalities testing results

In general, all the aforementioned aspects tested were fully functional. However, software installation proved troublesome. Nonetheless, collaboration with the developers allowed for correction of several problems such as inadequate wireless bridging and excessive image contrast, this last aspect displayed in Figure 3.

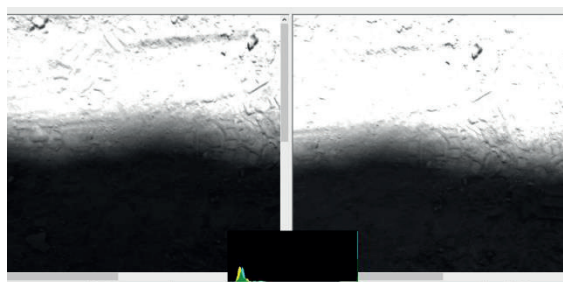


Figure 2 - High contrast due to incorrect shutter parameters.

Regarding the correct processing of graded rock images samples, it was intended to test the variance from material that, within expectable bounds, does not differ much from a fixed size range. That said, three different materials were sampled from multiple angles as to eliminate bias: “Brita 2”, ranging from 31 to 50 mm, “Castina”, ranging from 50 to 80 mm and “Gabião”, ranging from 90 to 250 mm. All of these originate from greyish white limestone rock.

While the analysis lacks representativity, the precision of the equipment seems to dramatically increase from the smaller rock size intervals to the bigger ones, being relatively accurate for the “Gabião” rock size. The most logical reason for this is due to the sub-resolution particle error, concerning the inability of an imaging system to see fine particles below the resolution of the sensor and grouping sub-resolution particles into larger regions and erroneously classifying them as larger single particles. This, in turn, determines the lower limit on particle size that can be reliably detected, and the resolution of size classes detectable.

3.2 Intraquarry testing results

The average FRAGTrack™ distribution curve for each blast design scenario is displayed in Figure 4 (originating from 13 blasts in total); the reference situation does indeed display the occurrence of the problematic blocks over one meter, as shown by the reference curve increase in the 140 cm size range.

It seems obvious from the difference between the reference curve and the high explosive column that this last situation has improved considerably the observed fragmentation as well as apparently almost ending the existence of the referred boulders. While the pocket charge situation also seems to have strongly diminished their existence, its curve presents nearly the same observed fragmentation as the reference situation, for this reason being less useful.

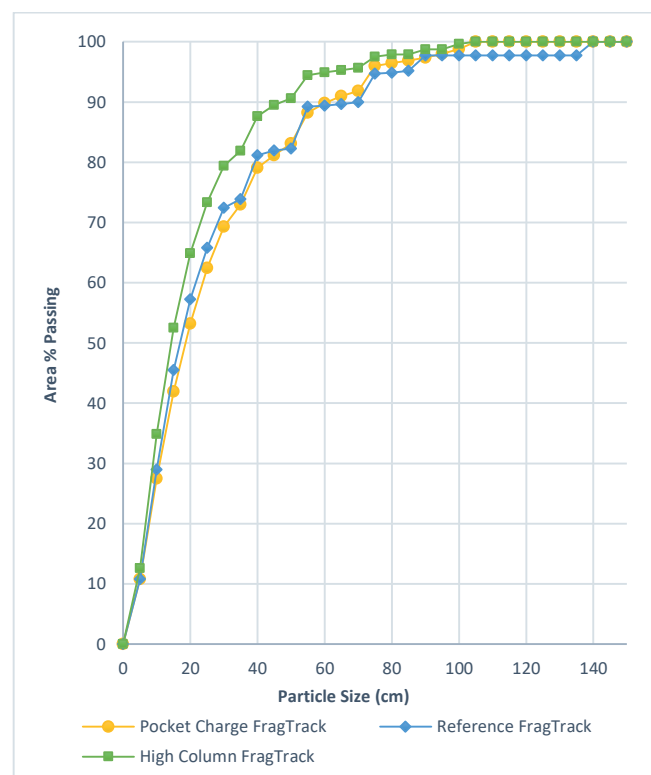


Figure 3 - Average FRAGTrack™ distribution curve for each blast design scenario.

The central tendency parameters of the above curves can be seen in Table 1. There, it can be confirmed that the weighted averages and initial curve progression of the reference and high column situations are very similar, only showing any difference after the 3rd quartile where the reference situation is very similar to the pocket charge situation. The high column situation also displays less data dispersion, as seen in its interquartile range, the lowest of the three, while the other two situations show almost the same amount of dispersion.

Table 1 - Central tendency parameters for the average FRAGTrack™ distribution curve for each blast design scenario.

	Weighted average (cm)	d ₂₅ (cm)	d ₅₀ (cm)	d ₇₅ (cm)	d ₈₀ (cm)	IQR (cm)
PC	33,1	9,5	18,2	32,9	39,7	23,4
REF	26,1	9,0	16,8	32,5	40,7	23,6
HC	26,5	8,7	16,1	28,3	33,6	19,6

Even though the results presented above are interesting from an operational standpoint and are a testament to the equipment’s precision, they do not reflect the reality of the equipment’s results, which are better compared to both mentioned empirical models.

The average results of both models computed from the tested blasts parameters can be seen in Table 2. There,

the KCO model predicts on average a smaller x_{50} value than the Kuz-Ram model.

Table 2 - Results of both empirical size fragmentation models for each interquarry blast design scenario.

		AVG	REF	HC	PC
Kuz-Ram	n	1,288	1,374	1,378	1,148
	x_{50} (cm)	39,2	38,2	35,8	42,3
KCO	n	1,288	1,374	1,378	1,148
	S_f (cm)	200	200	200	200
	x_{max} (cm)	200	200	200	200
	b	-4,682	-4,890	-4,994	-4,286
	x_{50} (cm)	28,4	27,0	27,4	30,3

The resulting curves are displayed in Figure 5 and 6 for the Kuz-Ram and KCO models, respectively.

In Figure 5, it is apparent that a discrepancy exists between Kuz-Ram and FRAGTrack™ data: the Kuz-Ram model prediction appears to be much coarser than the observed (and likely realistic) finer FRAGTrack™ fragmentation. Unsurprisingly, given the mentioned Kuz.Ram general inability to correctly predict the quantity of fine rock fragments, this discrepancy is most notable in the 0 to 35 cm range, where the FRAGTrack™ values are almost double of the Kuz-Ram ones. In itself, that is a good sign, as is the size range of 90 cm in which these two sets start to approximate themselves, a region where the Kuz-Ram model is perceived as somewhat precise.

In Figure 6, the previous discrepancy between the model and the FRAGTrack™ data is less noticeable but the FRAGTrack™ data remains finer than the KCO prediction until approximately 40 cm, where all curves start to converge with the exception of the high column observed by the prototype. Again, it is a good sign regarding the accuracy of the equipment given the established weakness of the KCO model to correctly predict fragmentation in the finer size ranges. Where the KCO model excels is in its precision related to the medium to coarse size ranges (starting from 50 cm), which is precisely where the data from both sets starts to converge. This, in turn, points to the precision of the equipment since there is a general agreement of all three curves of both data sets.

The error from the Kuz-Ram model and the KCO to the FRAGTrack™ data for each blast type (e.g., average reference Kuz-Ram and average reference FRAGTrack™) can be seen in Table 3.

Table 3 - Average errors types of the Kuz-Ram and KCO curves of Figure 5 and 6, respectively.

Kuz-Ram	MAD (cm)	MSE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)
PC	11,7	283,6	16,3	28,6
REF	9,7	293,2	17,1	42,1
HC	12,8	316,9	17,8	35,8
KCO	MAD (cm)	MSE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)
PC	4,9	87,7	9,4	16,3
REF	5,4	119,1	10,9	17,7
HC	5,1	102,6	10,1	18,5

In Table 3, it can be seen that at any point of the curves there exists, on average, an absolute deviation of at least 10 and 5 cm to the Kuz-Ram and KCO models, respectively, the highest average value of absolute deviation being in the high column Kuz-Ram situation and the lowest in the pocket charge KCO situation. While this may seem significant, the variance in this error is considerable, as can be seen by the MSE and RMSE errors, which suggest a higher variance in the comparison of FRAGTrack™ data to the KCO model due to these values being the double of the MAD values, whereas in the Kuz-Ram model they are slightly less than the MAD values. Nonetheless, the RMSE errors for the Kuz-Ram model are objectively higher. Regarding the MAPE, the discrepancy between Kuz-Ram and KCO values is apparent, the absolute error being near half in the second model.

The average error from the Kuz-Ram model and the KCO to the FRAGTrack™ data can be seen in Table 4 and contains what is possibly the most interesting (if reductive) value of this work: the global mean absolute percentage error of these models to the FRAGTrack™ data.

Table 4 - Overall average error types of each empirical predicted fragmentation model to FRAGTrack™ data.

	MAD (cm)	MSE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)
Kuz-Ram	12,0	273,9	16,7	35,5
KCO	5,5	103,2	9,8	17,4

It can be seen from the values of Table 4 that the equipment has a considerable value of error and variance to the two models. While the difference to the Kuz-Ram model is somewhat expected (and to some extent welcomed), the difference to the KCO model is more “dangerous” but, as it is in the size ranges where the KCO is generally regarded as less accurate, it is also an encouraging factor regarding the precision and accuracy of the prototype.

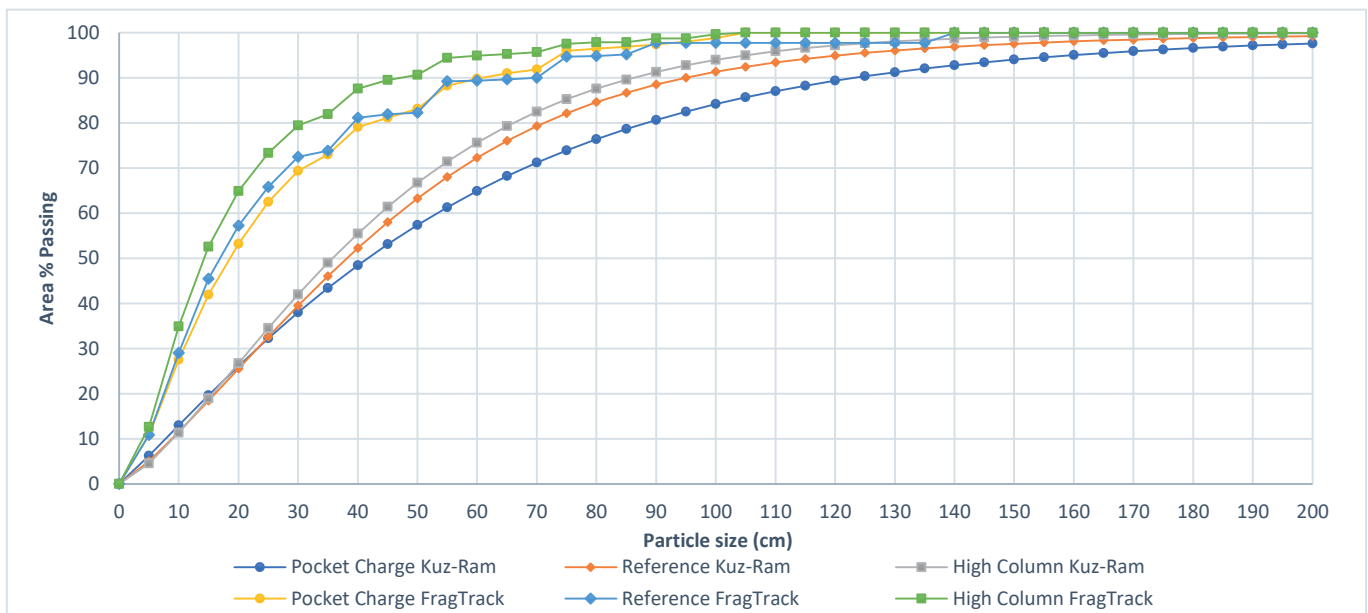


Figure 4 - Comparison of the average fragmentation curve predicted by the Kuz-Ram model and the observed FRAGTrack™ data for each blast scenario of the intraquarry analysis.

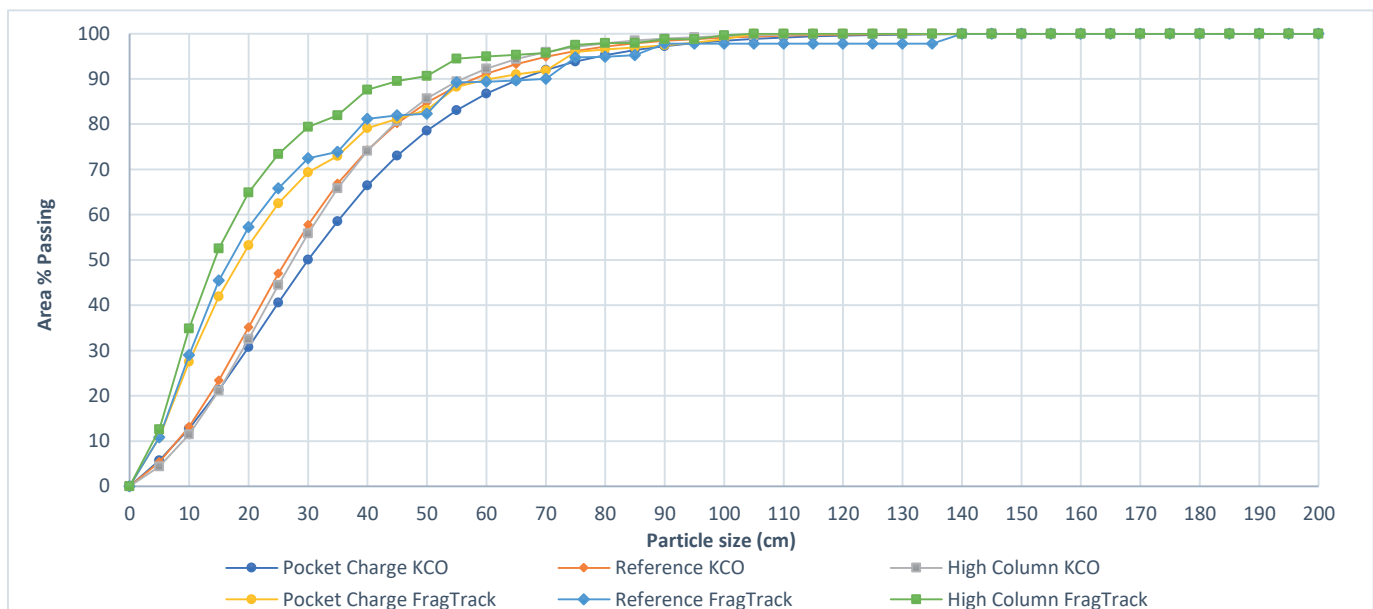


Figure 5 - Comparison of the average fragmentation curve predicted by the KCO model and the observed FRAGTrack™ data for each blast scenario of the intraquarry analysis.

Although, from what has mentioned above, the error and variance are significant, it should be mentioned that both of these factors are so in the direction of finer fragmentation curves and, therefore, are likely to be considerably nearer the ground truth than results predicted by the empirical models. While it is probably impossible to determine how close to the ground truth the results are without a sieving analysis process, this testing allowed to ascertain that the results are at least precise and consistent.

3.3 Interquarry testing results

While all the aforementioned test sites provided interesting results, the ones from the *Pedreira do calcário* quarry are the most interesting—for reasons that will be made obvious ahead—due to the brittle nature of the rock in this quarry. The parameters used in the empirical models and the resulting curves are displayed in Table 5 and Figure 7; it can be noted that the x_{50} values of both models are very similar.

Table 5 - Results of both empirical size fragmentation models for the *Pedreira do calcário* quarry.

Kuz-Ram parameters	n	1,281
	x_{50} (cm)	11,4
KCO parameters	n	1,288
	S_f (cm)	100
	x_{max} (cm)	100
	b	-4,128
	x_{50} (cm)	10,2

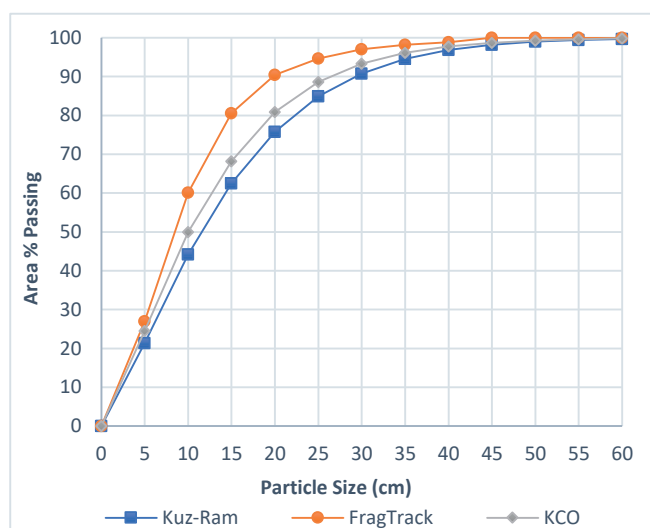


Figure 6 - Comparison of the fragmentation curve predicted by the Kuz-Ram and KCO models and the observed FRAGTrack™ data for the *Pedreira do Calcário* quarry.

In Figure 7, a similar scenario to the previous graphs can be seen: the FRAGTrack™ curve above the KCO model, in turn above the Kuz-Ram model. However, while the FRAGTrack™ curve may seem substantially above the other two, it is due to the horizontal scale being much narrower than in previous figures. In fact, this quarry presents a very brittle and soft limestone geology from which results a very fine fragmentation curve (80% fragments have their diameter under approximately 20 cm wide).

Table 6 presents the error of each empirical predicted fragmentation model to FRAGTrack™ data.

Table 6 - Error types of each empirical predicted fragmentation model to FRAGTrack™ data of Figure 7

	MAD (cm)	MSE (cm)	RMSE (cm)	MAPE (%)
Kuz-Ram	3,99	48,99	7,00	6,94
KCO	2,64	21,63	4,65	4,06

What is most remarkable about these results are the overall considerably low values of MAPE. This low error is an extremely good sign regarding the prototype's ability to predict blasts with a finer

fragmentation: the brittle and soft geology allows the empirical models to easily predict the resulting blast fragmentation, as a blast in this type of quarry (provided that the blast design is correct) rarely is expected to produce a large amount of coarse particles and almost never produces boulders. This capacity in predicting this type of blast result is apparent in Figure 7, as the two model's curves are very similar. However, there seems to be a significant amount of variance as indicated by relatively considerable RMSE values—probably due to insufficient sampling.

Therefore, it can be admitted that the models are very close to the ground truth (especially the KCO model, by a small margin) and that the prototype, in matching their predictions, observed and classified the particles with remarkable precision and accuracy.

4. Conclusions

In short, the FRAGTrack™ Mobile prototype displayed what appear to be mostly positive results in both the field-testing and image analysis components, especially given its alpha stage of development. Furthermore, the prototype was compared to empirical fragmentation models and, at least, predicted finer rock sizes than these models, which is certainly a good sign. While empirical models are useful for the scientific community to easily compare fragmentation results, they are still a work in progress and depend on qualitative information that had to be estimated.

Regardless, and more objectively, the research and fieldwork from which this work stemmed served the undeniable purpose of putting a virgin prototype in a real and problematic operational situation with a tangible blast design-oriented objective and proving that it could reach that goal with a relatively small number of observations. This meant that the prototype was exposed to inexperienced users who, by constant contact with the prototype developers, provided insight on how other users might operate the equipment and revealed its initial development problems.

On a more critical note, this work has many shortcomings that lead to possible future works. Without a doubt, the greatest flaw of this work is the lack of comparison of the FRAGTrack™ data with systemic and unbiased computer-based image analysis. Thus, image analysis comparison would be

the most interesting future work regarding the development process of this equipment.

References

- Bamford, T., Esmaili, K., & Schoellig, A. (2017). A real-time analysis of post-blast rock fragmentation using UAV technology. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 31(6), 439-456.
- Cunningham, C. (1983). The Kuz-Ram Model for Prediction of Fragmentation from Blasting. *1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, (pp. 439–453). Lulea, Sweden.
- Cunningham, C. (1987). Fragmentation Estimations and Kuz-Ram Model—Four Years On. *2nd Int. Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, (pp. 475–487). Keystone, Colorado.
- Deniz da Gama, C., & Jimeno, C. L. (1993). Rock Fragmentation Control for Blasting Cost. *4th International Symposium of Rock*. Viena: A. A. Balkema Publishers.
- Gheibie, S., Aghababaei, H., Hoseinie, S., & Pourrahimian, Y. (2009). Modified Kuz—Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 967-973.
- Hartman, H., & Mutmansky, J. (2002). *Introductory Mining Engineering*. Pushp Print Services.
- Jahani, M., & Taji, M. (2015). Comparison of Empirical Fragmentation Models at the Gol-Gohar Iron Ore Mine. *11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting* (pp. 707–714). Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Kulatilake, P., Qiong, W., Hudaverdi, T., & Kuzu, C. (2010). Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks. *Engineering Geolog, Volume 114, Issues 3–4*, 298-311.
- Lilly, P. (1986). An empirical method of assessing rock mass blastability. *Large Open Pit Planning Conference*, (pp. 89–92). Parkville, Victoria; Australian.
- Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1016/C2009-0-21512-1>
- Noy, M. J. (2017). *FragTrack Mobile Alpha User Guide*.
- Ouchterlony, F. (2005). The Swebrec© function: linking fragmentation by blasting and crushing. *Mining Technology*, A29-A44.
- Ouchterlony, F., Sanchidrián, J. A., & Moser, P. (2017). Percentile Fragment Size Predictions for Blasted Rock and the Fragmentation–Energy Fan. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(4), 751–779.
- Rosin, P., & Rammler, E. (1933). The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal. *Journal of the Institute of Fuel*, 7, 29–36.
- Rothery, K., & Mellor, S. (2007). *Crushing and Screening*. Nottingham : Nottingham Institute of Quarrying.
- Sereshki, F., Hoseini, M., & Ataei, M. (2016). Blast fragmentation measurement using image processing. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 50, 211-218.
- Statistics: How To. (2016, October 25). *Absolute Error & Mean Absolute Error*. Retrieved September 2, 2018, from Statistics: how to?:
- Sudhakar, J. A. (2006). Comparison of fragmentation measurements by photographic and image analysis techniques. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39, 159-168.
- Thurley, M. J. (2013). Automated Image Segmentation and Analysis of Rock Piles in an Open-Pit Mine. *IEEE International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/6691484>



Beyond Performance

Uma gama completa de soluções aliadas à experiência de mais de 140 anos de inovação e talento.

Explorações a céu aberto, pedreiras, explorações subterrâneas, aplicações sísmicas, construção... de Angola até à Austrália ou da Mongólia ao Panamá com um legado de mais de 140 anos desde a sua fundação por Alfred Nobel.

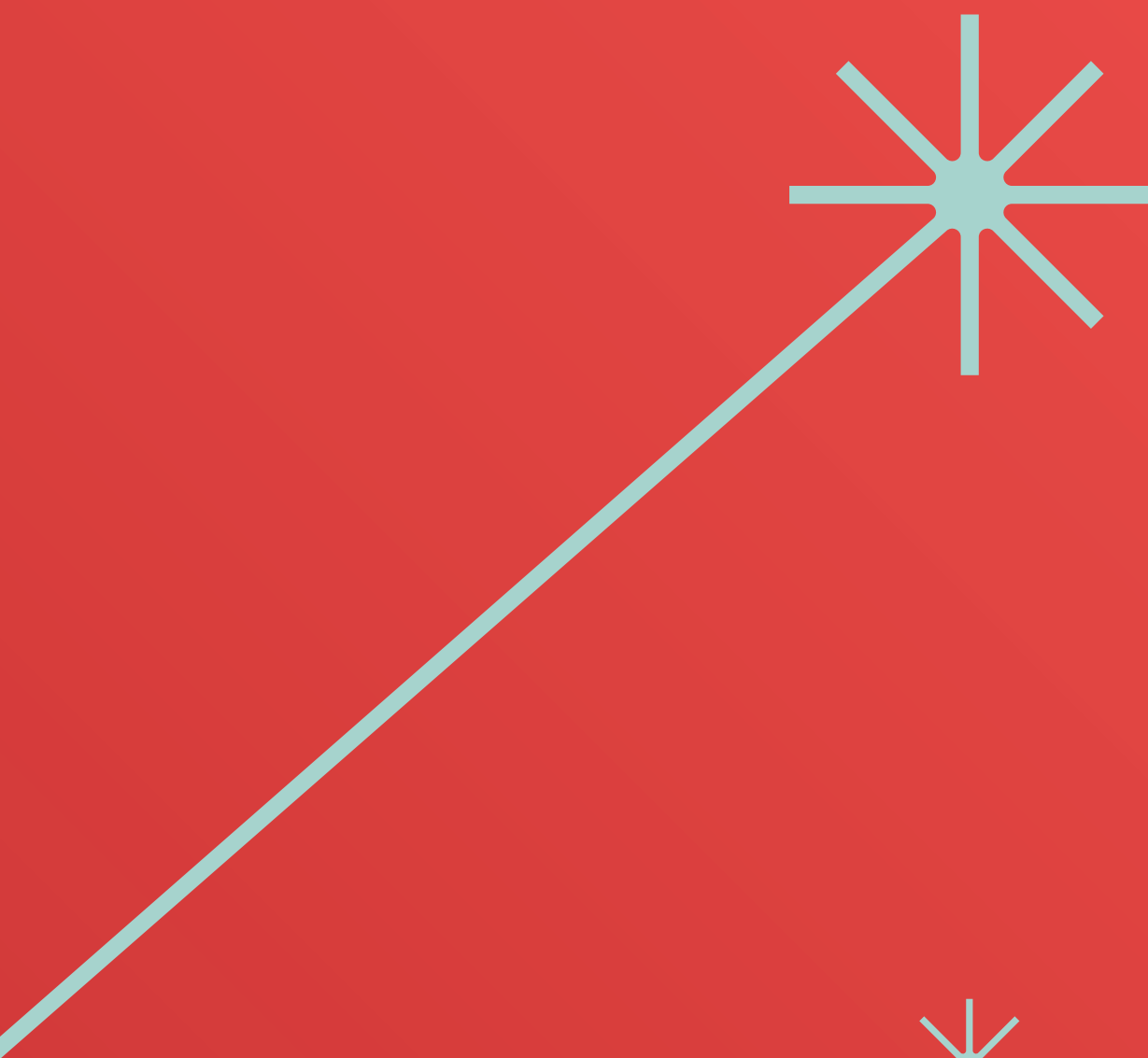
Os engenheiros da MAXAM estão à frente de complexos projectos de aplicação de explosivos. Uma gama completa de produtos da MAXAM dá resposta às necessidades mais exigentes em qualquer local do mundo, desde a actividade mineira subterrânea até projectos especiais nos cinco continentes.

EXPLOSIVOS ENCARTUCHADOS E
ENSACADOS · EXPLOSIVOS A GRANEL ·
SISTEMAS DE INICIAÇÃO ·
ACESSÓRIOS

MAXAMPOR S.A
Estrada Nacional, 118 km 1,
Rego de Amoreira
2890 - 168 Alcochete, Portugal
Tel: +351 212 308 800
Fax: + 351 212 308 852

www.maxam.net
maxampor@maxam.net





ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA
DE ESTUDOS E ENGENHARIA
DE EXPLOSIVOS